

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего
образования «Российский государственный университет
им. А.Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство)»
(ФГБОУ ВО «РГУ им. А.Н. Косыгина»)



На правах рукописи

БЕЛИЦКАЯ ОЛЬГА АЛЕКСАНДРОВНА

**НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РАЗРАБОТКИ СПЕЦИАЛЬНОЙ
АНТИСТАТИЧЕСКОЙ ОБУВИ И МЕТОДОВ ОЦЕНКИ ЕЕ СВОЙСТВ**

Специальность 2.6.16. Технология производства изделий
текстильной и легкой промышленности

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание учёной степени доктора технических наук

Научный консультант:
доктор технических наук,
профессор Костылева В.В.

Москва – 2025

ОГЛАВЛЕНИЕ

	ВВЕДЕНИЕ.....	6
ГЛАВА 1.	ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ФОРМИРОВАНИЯ И ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА СПЕЦИАЛЬНОЙ ОБУВИ.....	20
1.1.	Антистатическая обувь, как предмет исследования.....	22
1.2.	Основные стандарты, регламентирующие применение и производство специальной обуви, в том числе антистатической.....	30
1.3.	Требования, предъявляемые к рабочей обуви по отраслям производства.....	48
1.4.	Анализ современного рынка антистатической обуви.....	58
1.5.	Классификация деталей специальной обуви по защитным свойствам.....	71
	ВЫВОДЫ ПО ПЕРВОЙ ГЛАВЕ.....	74
ГЛАВА 2.	РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ И ИССЛЕДОВАНИЯ ФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ОБУВНЫХ МАТЕРИАЛОВ.....	77
2.1.	Электростатические явления в технологических процессах и их воздействие на человека.....	77
2.2.	Разработка метода и методики измерения показателей электростатических свойств обувных материалов.....	102
2.3.	Исследования электростатических свойств материалов конструкций обуви.....	112
2.3.1.	Исследования электростатических свойств материалов наружных деталей верха обуви.....	112
2.3.2.	Исследования электростатических свойств материалов внутренних деталей верха обуви.....	115
2.3.3.	Исследования электростатических свойств материалов промежуточных деталей верха обуви.....	118
2.3.4.	Исследования электростатических свойств материалов внутренних деталей низа.....	119
2.3.5.	Исследования электростатических свойств материалов наружных деталей низа.....	125

2.4.	Разработка и реализация метода исследования электростатических свойств материалов в широком диапазоне температур.....	129
2.5.	Разработка автоматизированного экспресс-метода измерения времени релаксации электростатических зарядов.....	142
2.5.1.	Определение времени релаксации электростатических зарядов материалов носочно-чулочных изделий.....	145
2.5.2.	Определение времени релаксации электростатических зарядов материалов верха обуви и промежуточных деталей низа обуви.....	148
2.5.3.	Определение времени релаксации электростатических зарядов подошвенных материалов.....	153
	ВЫВОДЫ ПО ВТОРОЙ ГЛАВЕ.....	156
ГЛАВА 3.	ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СИСТЕМЫ «ОБУВЬ - ЧЕЛОВЕК - НАПОЛЬНОЕ ПОКРЫТИЕ».....	159
3.1.	Методики определения электрического сопротивления обуви и обувных материалов и их практическое применение.....	159
3.1.1.	Методики измерения поверхностного удельного электрического сопротивления материалов.....	159
3.1.2.	Исследование электрического сопротивления материалов обуви специального назначения.....	164
3.1.3.	Установление корреляционных зависимостей антистатических показателей материалов обуви специального назначения.....	169
3.1.4.	Исследование электрического сопротивления и постоянной времени релаксации электростатического заряда обуви специального назначения.....	175
3.2.	Разработка математической модели электризации человека в системе «обувь - человек - напольное покрытие».....	186
3.3.	Имитационное статистическое моделирование электрического пробоя в защитном материале.....	208
	ВЫВОДЫ ПО ТРЕТЬЕЙ ГЛАВЕ.....	232

ГЛАВА 4.	РАЗРАБОТКА МЕТОДА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ И АНАЛИЗА АНТИСТАТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СИСТЕМЫ «ОБУВЬ – ЧЕЛОВЕК – ОКРУЖАЮЩАЯ СРЕДА».....	235
4.1.	Общие сведения о моделировании статического электричества на теле человека.....	235
4.2.	Разработка метода и экспериментальные исследования системы «обувь - человек – окружающая среда».....	240
4.3.	Моделирование и экспериментальная оценка электростатических зарядов в системе «обувь - человек - окружающая среда».....	264
4.3.1.	Разработка математической модели опытных данных....	268
4.3.2.	Корреляционный и спектральный анализы динамики накопления электростатических зарядов.....	274
4.3.3.	Математическая модель динамики накопления электростатических зарядов.....	278
4.3.4.	Статистический анализ динамики стекания электростатических зарядов.....	283
4.3.5.	Методика обработки результатов эксперимента по оценке динамики накопления и стекания заряда.....	292
4.3.6.	Моделирование накопления и стекания электростатического заряда в системе «обувь – человек – окружающая среда».....	297
4.4.	Визуализация экспериментальных исследований системы «обувь - человек - окружающая среда».....	303
	ВЫВОДЫ ПО ЧЕТВЕРТОЙ ГЛАВЕ.....	311
ГЛАВА 5.	РАЗРАБОТКА НАУЧНО-ОБОСНОВАННОЙ КОНСТРУКЦИИ АНТИСТАТИЧЕСКОЙ ОБУВИ.....	313
5.1.	Анализ условий труда и производственных факторов предприятий нефтегазодобычи.....	313
5.2.	Исследование антистатических свойств специальной обуви в реальных условиях эксплуатации.....	320
5.3.	Разработка концепции конструкции антистатической обуви с заземляющими свойствами.....	324
5.4.	Совершенствование конструкций обуви по показателю антистатичности с использованием аддитивных технологий.....	339

5.5.	Совершенствование технологий изготовления низа антистатической обуви и ее элементов с использованием инструментов 3D-прототипирования.....	349
5.6.	Разработка интегрированной базы данных антистатических свойств обуви.....	357
5.7.	Стадии жизненного цикла разработки инновационной конструкции антистатической обуви.....	363
	ВЫВОДЫ ПО ПЯТОЙ ГЛАВЕ.....	367
	ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	369
	СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	374
	ПРИЛОЖЕНИЕ А. Анкета ФГБОУ ВО «РГУ им. А.Н. Косыгина».....	426
	ПРИЛОЖЕНИЕ Б. Сведения об исследованных материалах, использованных в работе.....	430
	ПРИЛОЖЕНИЕ В. Информационная база электростатических характеристик исследованных образцов материалов обуви.....	435
	ПРИЛОЖЕНИЕ Г. Результаты измерений напряженности ЭСП в системе «обувь - человек - окружающая среда».....	439
	ПРИЛОЖЕНИЕ Д. Графическое отображение экспериментальных и модельных результатов измерения напряженности ЭСП в системе «обувь - человек - окружающая среда».....	464
	ПРИЛОЖЕНИЕ Е. Показатели регрессионных моделей по результатам экспериментов измерения напряженности ЭСП в системе «обувь - человек - окружающая среда».....	496
	ПРИЛОЖЕНИЕ Ж. Акты внедрения.....	499

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. По данным рейтингового агентства Grand View Research, мировой рынок средств индивидуальной защиты (СИЗ) в 2024 году составил свыше 80 млрд. долларов, порядка 3% из которых приходится на долю российских производителей. Согласно аналитическим прогнозам на период до 2030 года ежегодный прирост производства СИЗ в среднемировом исчислении составит 6,7%, а в России достигнет 13% [1].

Драйверами роста рынка СИЗ, к которым, в том числе, относится специальная обувь, являются повышенные требования к охране труда и безопасности на рабочих местах; внедрение новых материалов, в том числе, на основе химических волокон и полимерных связующих; технологические инновации в области обувного производства, связанные с увеличением рабочих скоростей оборудования для интенсификации технологических процессов; а также наличие конкурентной среды.

К особой категории специальной обуви, которая входит в номенклатуру СИЗ, относится антистатическая обувь, не позволяющая накапливаться на теле человека электростатическим зарядам и предохраняющая его от воздействия электрического напряжения производственной частоты. Такая обувь находит широко применение в ряде отраслей промышленности, сопряжённых с образованием электростатического поля (ЭСП), например, нефте- и горнодобывающая, микроэлектроника, электроэнергетика, пожарная служба и др.

Обеспечение работников производств специальной антистатической обувью связано не только с вопросами здоровьесбережения, но и экономической составляющей, в части стоимости производства продукции. Так, по данным Европейских промышленных экспертов из-за негативного проявления статического электричества ежегодная потеря денежных средств составляет до 8 млрд. долларов, а доля утраты изделий – от 8 до 33% от общего объема выпуска [5]. На нефтегазоперерабатывающих предприятиях в 27% случаев причиной взрывов паровоздушных смесей является статическое электричество.

Основу производства обуви с антистатическим эффектом определяют теория статической электризации, понимание механизмов ее проявления, включая генерацию и нейтрализацию зарядов, влияние электростатических зарядов и полей на протекание технологических процессов, создание эффективных средств и методов устранения отрицательных проявлений статической электризации. Особая роль значительного прогресса в этой области принадлежит современной приборной технике: исследования и контроля электризации в технологических процессах, широкое внедрение в практику цифровых инструментов, компьютерных программ, вычислительных комплексов по оценке электростатических свойств материалов различного состава.

Все это в совокупности создает условия для перехода от преимущественно эмпирического подхода, к научно обоснованным методам оценки влияния электризации на систему «обувь – человек – окружающая среда», определения требований к электростатическим свойствам обувных конструкций и разработки технологии производства специальной обуви с антистатическими свойствами.

В такой постановке проблемы настоящая работа на тему «Научно-практические основы разработки специальной антистатической обуви и методов оценки ее свойств» представляется актуальной, отвечает Приоритетам и перспективам научно-технологического развития, обозначенным в Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации (Указ Президента Российской Федерации от 28 февраля 2024 г. № 145) [2], а также Приоритетным направлениям развития легкой промышленности (Сводная стратегия развития обрабатывающей промышленности Российской Федерации до 2024 года и на период до 2035 года, утвержденная распоряжением Правительства Российской Федерации от 6 июня 2020 г. № 1512-р (в редакции от 21 октября 2024 г.) [3].

Степень научной разработанности проблемы. Изучением вопросов электростатики в промышленности и на производстве занимались такие ученые как: *Кечиев Л.Н., Пожидаев Е.Д., Хорват Т., Берта И., Гефтер П.Л., Мазо Г., Погожев С.В., Максимов Б.К., Обух А.А., Черкасов В.Н., Имянитов А.М. и др.*

В области оценки влияния электростатического поля на живые организмы следует отметить работы таких ученых, как *Bean C., Bennett A., Gneno R., Azzar G., Got R., Habluetzel Ch., Sennhauser Th., Weidman U., Меркулова А.И., Кадников О.Г., Кабизский В.И., Товстяк В.В., Арируни Г.Г., Оганесян О.В., Ковальчук Е.В., Чихунова С.Д., Саргуне А.И., Межлулян Л.М., Саакян Р.А., Станкевич К.И., Шумова Л.З., Пирузян Л.А., Романов Г.В., Алехина С.М., Ершова Л.К., Антипов В.В., Добров Н.Н., Добрышев В.И., Зильфян А.В., Азгалдян Н.Р., Довлатян Р.А., Рапаян Ю.А., Джингозян А.К., Тоноян Г.А., Протасов В.Р., Сердюк О.А., Каневская Ж.С., Добржанская А.К., Маркова Т.Ф., Кривова Т.И., Морозов Ю.А., Якубенко А.В.* и др. Изучению трибоэлектрических и антистатических свойств материалов посвящены исследования *Жихарева А.П., Краснова Б.Я., Кротковой Р.Д., Таточенко И.М., Станкевич К.И., Цендровской В.А., Василенок Ю.И., Изгородина А.К., Семикина А.П., Черуновой И.В., Меркуловой А.В., Горчакова В.В., Бринка И.Ю.* и др.

Вопросы развития, совершенствования, проектирования обуви, в т.ч. специальной освещены в работах *Зыбина Ю.П., Фукина В.А., Костылевой В.В., Никитина А.А., Татарчука И.Р., Ключниковой В.М., Савчука Н.П., Киселева С.Ю., Горбачика В.Е., Рыковой Е.С., Бекк Н.В., Карабанова П.С.* и др.

Несмотря на большое количество работ, посвященных обувной проблематике в контексте разработки специальной обуви и оценки ее свойств, среди них практически отсутствуют комплексные исследования электростатических свойств обувных материалов и конструкций. В связи с этим, в настоящее время не представляется возможным надежно прогнозировать показатели антистатических свойств обуви, характер поведения и стекания электростатических зарядов с тела человека, и в целом оценивать взаимодействие в системе «специальная обувь – человек – окружающая среда».

В условиях цифровизации отдельных производств и экономики в целом решение проблем оценки и прогнозирования состояния многокомпонентных систем, к которым относится система «специальная обувь – человек – окружающая среда» [66], невозможно без применения современных вычислительных программ

и комплексов, позволяющих устанавливать причинно-следственные связи между количественными (функциональными) и качественными (клиентоориентированными) характеристиками проектируемых изделий.

Все вышесказанное составляет особенность настоящей диссертации, направленной на разработку научно обоснованных подходов к проектированию и производству специальной антистатической обуви, обоснованный выбор материалов; конструкций и технологических приемов обработки обувных заготовок; применение новых методик и методов оценки электростатических свойств материалов и обувных конструкций в целом, позволяющих производить анализ их электростатических показателей в различных условиях, приближенных к реальным; построение прогнозных моделей, включающих совокупность факторов, влияющих на качество проектируемого изделия.

Область исследования. Работа выполнена в соответствии с п. 3. «Технологии (в том числе, нанотехнологии) волокон, нитей, материалов и изделий текстильной и легкой промышленности (ИТЛП)»; п. 7. «Цифровое прогнозирование, математические методы, информационные технологии моделирования технологических процессов первичной обработки сырья, организации производства и изготовления волокон, нитей, материалов и изделий текстильной и легкой промышленности»; п. 14. «Аддитивные технологии. Автоматизация процессов построения и моделирования ИТЛП в виртуальной среде, в том числе с использованием технологий обратного инжиниринга»; п. 29. «Стандартизация, сертификация, организация производства и управление качеством материалов и ИТЛП» паспорта научной специальности 2.6.16. «Технология производства изделий текстильной и легкой промышленности».

Объект исследования: материалы и конструкции антистатической обуви, а также их электростатические свойства в контексте взаимодействия с окружающей средой и пользователями.

Предмет исследования: нормативная документация, регламентирующая уровни электростатических полей, технологические процессы производства обуви, конструкции специальной обуви, материалы деталей верха и низа обуви,

потребительские свойства обуви, методы и приборы количественного определения показателей свойств в системе «обувь – человек – окружающая среда».

Цель исследования. Целью настоящей диссертации является разработка научно-практических основ проектирования и методов оценки электростатических свойств материалов и конструкций специальной обуви, как цифровой технической системы с соответствующими связями между ее характеристиками, позволяющими прогнозировать и расширять функционал изделий.

Для достижения поставленной цели в работе решены **следующие задачи:**

- **изучена и систематизирована** информация по вопросам влияния статического электричества на технологические процессы и производственный персонал;
- **проведен анализ**
 - актуальной нормативной документации, регламентирующей уровни электростатических полей, процессы проектирования и сертификации специальной, в том числе антистатической обуви;
 - современного рынка антистатической обуви, ассортимента и свойств продукции, конструктивных вариантов, и, как следствие, функциональных и эксплуатационных характеристик изделий;
- **дана** экспертная оценка рынка рабочей обуви в различных отраслях производств для определения критериев ее выбора;
- **разработаны**
 - классификация диапазонов электрического сопротивления антистатической обуви на основе нормативно-технических документов, которая упрощает процесс выбора и заказа защитного изделия;
 - классификация конструкций специальной обуви, которая допускает интеграцию в документы, устанавливающие нормы выдачи, и обеспечивает обоснованный подбор средств индивидуальной защиты работников;
 - динамический метод и методика экспериментального исследования трибоэлектрических свойств обувных материалов, позволяющие исследовать

динамику накопления и релаксации поверхностной плотности заряда при взаимодействии разнородных материалов;

- метод исследования трибоэлектрических свойств материалов обуви в интервале температур от -50°C до $+60^{\circ}\text{C}$, с использованием камеры, включающей элементы Пельтье и камертонный датчик ЭСП;
- автоматизированная экспресс-методика измерения времени релаксации электростатического заряда, образующихся на обувных материалах;
- метод оценки в реальных условиях эксплуатации антистатических показателей в системе «обувь - человек - напольное покрытие» с использованием индикатора-регистратора ИРИ-04М на основе модели человеческого тела;
- математическая модель системы «обувь - человек - окружающая среда» с использованием универсального метода адаптивного случайного поиска;
- алгоритмы расчетной оценки электростатической безопасности (ЭСБ), по математическим моделям, генерирующим конкретные рекомендации по снижению электростатического риска, включая изменения в проектировании обуви, параметров окружающей среды и организации предметно-пространственной среды рабочего персонала;
- математическая модель электризации системы «обувь - человек - напольное покрытие», позволяющая фиксировать взаимосвязи накопления электростатических зарядов на теле человека от электрического потенциала, наличия обуви и одежды различной диэлектрической проницаемости;
- компьютерная модель протекания потока электрических зарядов сквозь диэлектрические материалы, к которым относятся материалы низа обуви, учитывающая статическую неоднородность его электропроводности;
- интегрированная база данных антистатических свойств обуви, позволяющая прогнозировать характеристики новых комбинаций материалов на основе накопленного массива экспериментальной информации.

- **проведены:**

- корреляционный и спектральный анализы динамики накопления электростатического заряда в системе «обувь - человек - окружающая среда»;
- статистический анализ динамики стекания заряда в системе «обувь - человек - окружающая среда»;
- **выявлены** корреляционные зависимости напряженности ЭСП от сопротивления обувных материалов;
- **предложены**
- методика оценки безопасности специальной обуви в системе «обувь – человек – окружающая среда», позволяющая проводить испытания с учетом температурных режимов эксплуатации;
- комплексная математическая модель показателей в системе «специальная обувь – человек – напольное покрытие» для оценки воздействия накопления электростатического заряда на персонал и технологические системы;
- модель макроскопически неоднородной среды для создания участков различной местной проводимости путём повышения устойчивости материалов, применяемых при производстве обуви, к электрическим разрядам;
- **сформулирована** концепция и предложены научно обоснованные решения конструкций антистатической специальной обуви с заземляющими свойствами для производственных рабочих и инженерно-технических работников.

Исследования проводились на кафедре художественного моделирования, конструирования и технологии изделий из кожи, в рамках научно-исследовательских работ РГУ им. А.Н. Косыгина на 2019-23 гг., проблема 1 «Матричный подход к формированию цифровой индустрии 4.0 на промышленных предприятиях текстильной и легкой промышленности», Тема 1.2 «Развитие инновационного потенциала предприятий по производству изделий из кожи на основе современных цифровых технологий проектирования и быстрого прототипирования».

Научную новизну диссертации определяют результаты теоретических и экспериментальных исследований по разработке научно обоснованных

технических и технологических решений в области проектирования, производства, моделирования и анализа свойств специальной антистатической обуви, соответствующей состоянию предметно-пространственной среды работников производств, повышающей электростатическую безопасность человека и технологических процессов.

При этом **впервые:**

- разработан динамический метод экспериментального исследования трибоэлектрических свойств обувных материалов, позволяющий проводить измерения и обеспечивать высокую точность и воспроизводимость данных динамики накопления и релаксации поверхностной плотности заряда при взаимодействии разнородных материалов в широком температурном интервале (получен патент);
- создана автоматизированная экспресс-методика измерения времени релаксации электростатического заряда с поверхности специальной обуви, позволяющая быстро и эффективно оценивать электростатические характеристики отдельных материалов, пакетов материалов и в целом конструкции, в соответствии с критериями ЭСБ;
- разработана модель прогнозирования накопления электростатического потенциала на теле человека при эксплуатации типовых конструкций из различных обувных материалов, которая позволяет оценить риск, связанный с электростатическими разрядами, в том числе во взрывоопасной среде;
- **предложены:**
 - методика оценки антистатических показателей системы «обувь – человек – окружающая среда» на основе модели человеческого тела, по показателям напряженности ЭСП и электростатического потенциала в реальных условиях эксплуатации готового изделия;
 - математическая модель корреляции между электростатическим полем и потенциалом тела человека в системе «обувь – человек – напольное покрытие»;
 - модель имитации возникновения и развития электрического пробоя в пакетах конструкций средств индивидуальной защиты на основе энергетических

представлений об образовании и разрастании разряда с учетом статистической неоднородности электропроводности материалов;

- **реализована** концепция и новые научно обоснованные решения конструкции антистатической специальной обуви с высокой устойчивостью показателей электрического сопротивления в условиях использования материалов и технологий, обеспечивающих надежный электрический контакт между телом человека и напольным покрытием, исключающих накопление статического электричества и минимизирующих риски его разрядов в производственной среде (получен патент).

Теоретическая значимость исследования обоснована решением научной проблемы по реализации нового подхода к определению антистатических показателей материалов, конструкций и свойств специальной обуви на основе систематизации знаний, включающей:

- закономерности накопления и релаксации трибоэлектрических зарядов на поверхности обувных материалов;
- температурные зависимости времени релаксации зарядов в диапазоне температур от -50°C до $+60^{\circ}\text{C}$, подчиняющиеся закону Аррениуса, применительно к обувной промышленности;
- установленный механизм накопления зарядов при взаимодействии в системе «обувь – человек – напольное покрытие» для оценки ЭСБ персонала и технологических систем;
- температурные зависимости величин удельного сопротивления рассеивающих материалов низа обуви с учетом механизмов возникновения микрозарядов и статической неоднородности электропроводимости материалов.

Созданы научные основы проектирования конструкций защитной антистатической обуви по показателям комплексной оценки и моделирования механизмов образования и стекания зарядов статического электричества, обеспечивающие минимизацию их негативных проявлений в системе «обувь-человек-окружающая среда».

Практическая значимость заключается в разработке комплексного подхода к созданию конструкции и технологии изготовления антистатической обуви с учетом влияния различных факторов окружающей среды (влажность, температура) в зависимости от условий эксплуатации и требований нормативных документов.

Предложены:

- пакеты обувных материалов, обеспечивающие оптимальные характеристики ЭСБ;
- метод экспериментального исследования трибоэлектрических свойств обувных материалов для измерения динамики накопления и релаксации поверхностной плотности заряда при взаимодействии разнородных материалов в температурном диапазоне от -50°C до $+60^{\circ}\text{C}$;
- автоматизированный экспресс-метод определения времени релаксации электростатического заряда с обувных материалов;
- модели человеческого тела и методика оценки антистатических характеристик системы «обувь – человек – окружающая среда» по показателям напряженности ЭСП и электростатического потенциала на теле человека, в реальных условиях эксплуатации обуви;
- открытая интегрированная база данных антистатических свойств обуви, позволяющая прогнозировать характеристики новых комбинаций материалов на основе накапливаемого массива экспериментальных данных;
- концепция разработки антистатической обуви, которая предполагает реализацию этапов от предпроектного анализа и создания прототипов до их тестирования и подготовки к массовому производству.

Отдельные результаты работы использованы при выполнении х/т № 1911-Х АО «ПТК «Модерам» (г. Санкт-Петербург) «Разработка научно-практических основ кастомизации специальной обуви в условиях массового производства», апробированы (Приложение Ж) на АО «Егорьевск-обувь» (Московская область, г. Егорьевск); ЗАО МОФ «Парижская коммуна» (г. Москва), ООО «НТМ-Защита» (г. Москва), ООО ТД «Яхтинг» (Чувашская республика, г. Чебоксары), которые свидетельствуют о состоятельности предлагаемых в диссертации решений, и

находят применение в виде монографий и учебных пособий в учебном процессе ФГБОУ ВО «РГУ им. А.Н. Косыгина» бакалавров, магистров, аспирантов по направлениям подготовки кафедры художественного моделирования, конструирования и технологии изделий из кожи.

Методология исследования базируется на общенаучных подходах системного и концептуального анализа, группировки, сравнения, агрегатирования и комбинаторики, научной абстракции и прогнозирования. Полученные результаты основаны на теоретических и научно-практических положениях материаловедения, технологии и конструирования изделий из кожи с использованием методов интеллектуального анализа данных, визуализации информации, конструирования и моделирования геометрических объектов, прототипирования, экспертных оценок, а также современных методов хранения и манипуляции данными, компьютерных и информационных технологий. Экспериментальные исследования проводились в лабораторных и производственных условиях. В работе использованы программные продукты Microsoft Office (Word, Excel, PowerPoint), Mathlab, COMSOL Multiphysics; прикладные графические программы CorelDRAW, Autodesk AutoCAD, включая CAD-системы и системы 3D-моделирования: Blender, SolidWorks, КОМПАС-3D.

Положения, выносимые на защиту:

- динамический метод и методика экспериментального исследования трибоэлектрических свойств обувных материалов, позволяющий исследовать динамику накопления и релаксации поверхностной плотности заряда при взаимодействии разнородных материалов в диапазоне температур от -50°C до $+60^{\circ}\text{C}$;
- автоматизированная экспресс-методика измерения времени релаксации электростатического заряда, образующихся на обувных материалах;
- метод оценки в реальных условиях эксплуатации антистатических показателей системы «обувь - человек - напольное покрытие» с использованием индикатора-регистратора ИРИ-04М;

- математическая модель электризации системы «обувь - человек - напольное покрытие», позволяющая фиксировать взаимосвязи накопления электростатических зарядов на теле человека от электрического потенциала, наличия обуви и одежды различной диэлектрической проницаемости;
- алгоритм расчетной оценки ЭСБ по математическим моделям, генерирующим конкретные рекомендации по снижению электростатического риска, включая изменения в проектировании обуви, уровня влажности окружающей среды и организации предметно-пространственной среды рабочего персонала;
- концепция и новые научно обоснованные решения конструкции специальной обуви с заземляющими свойствами для производственных рабочих и инженерно-технических работников;
- интегрированная база данных антистатических свойств обуви, позволяющая прогнозировать характеристики новых комбинаций материалов на основе накопленного массива экспериментальных данных.

Достоверность результатов проведенных исследований подтверждается согласованностью аналитических и экспериментальных данных, применением современных методов и средств исследования, апробацией основных положений диссертации в научной периодической печати и на конференциях, а также полученными патентами, актами внедрения и производственной апробации.

Личный вклад соискателя состоит в общей постановке задачи, выборе методов и направления исследования, разработке математических моделей, проведении научных и вычислительных экспериментов, обработке, анализе и интерпретации экспериментальных результатов. При непосредственном участии соискателя и/или под его руководством выполнены все исследования в лабораторных и промышленных условиях, по результатам которых подготовлены научные публикации и материалы для использования в образовательном процессе.

Апробация и внедрение результатов исследования. Теоретические положения, практические рекомендации и выводы представлялись, обсуждались в 2013-2024 гг. и получили положительную оценку на: заседаниях кафедры

художественного моделирования, конструирования и технологии изделий из кожи Российского государственного университета имени А.Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство); заседаниях кафедры технологии кожи и меха Российского государственного университета имени А.Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство); международных и всероссийских научных конференциях: «Факторы, влияющие на качество одежды и обуви» (Radom, Politechniki Radomskiej, март 2004), «Инновационные проекты» (Москва, МИФИ, январь 2006), «Инновационное развитие легкой и текстильной промышленности» (Москва, РГУ им. А.Н. Косыгина, 2014-2024), «Перспективы развития науки и образования» (Москва, «АР-Консалт», 29 ноября 2013 г.), «Академическая наука – проблемы и достижения» (Южная Каролина, США, 20-21 июня 2016 г.), «Кожа и мех в XXI веке: технология, качество, экология, образование» (Улан-Удэ, ВСГУТУ, 5-9 сентября 2016 г.), «Фундаментальные и прикладные научные исследования в области инклюзивного дизайна и технологий: опыт, практика и перспективы» (Москва, РГУ им. А.Н. Косыгина, 2016-2024), «О вопросах защиты интеллектуальной собственности и развития инноваций» (Крым, Алушта, 9 декабря 2016 г.), «Техническое регулирование: базовая основа качества материалов, изделий и услуг» (г. Шахты, ИСОиП (филиал) ДГТУ, 23-24 марта 2017 г.), «Международный Косыгинский форум» (Москва, РГУ им. А.Н. Косыгина, 2017-2024), «Прогрессивные технологии и оборудование: текстиль, одежда, обувь» (Витебск, УО «ВГТУ», 3 ноября 2020 г.), «Концепции в современном дизайне» (Москва, РГУ им. А.Н. Косыгина, 3-12 декабря 2020 г.), «Актуальные проблемы экспертизы, технического регулирования и подтверждения соответствия продукции текстильной и легкой промышленности» (Москва, РГУ им. А.Н. Косыгина, 28 октября 2021 г.), «Современные инновационные технологии в легкой промышленности: проблемы и решения» (Бухара, «БухМТИ», 19-20 ноября 2021 г.), «Инновации в текстиле, одежде, обуви (ICTAI-2023)» (Витебск, УО «ВГТУ», 9-10 ноября 2023 г.), «Инновационные технологии: кожа, мех, химические материалы, производство», (Москва, РГУ им. А.Н. Косыгина, 2023-2024), «Инновационные методы анализа функциональности изделий и материалов легкой

промышленности» (Санкт-Петербург, СПбГУПТД, 19 ноября 2024 г.), Международной мультидисциплинарной конференции по промышленному инжинирингу и современным технологиям «FarEastCon» (Владивосток, остров Русский, 2020-2021) и других, в материалах которых опубликованы научные статьи и доклады.

Диссертация обобщает результаты исследований, которые проведены под руководством и/или при непосредственном участии автора на кафедре художественного моделирования, конструирования и технологии изделий из кожи ФГБОУ ВО «РГУ им. А.Н. Косыгина». Материалы диссертации используются в учебном процессе ФГБОУ ВО «РГУ им. А.Н. Косыгина» бакалаврами и магистрами по направлениям подготовки 29.03.05/29.04.05 «Конструирование изделий легкой промышленности» и 29.03.01/29.04.01 «Технология изделий легкой промышленности», аспирантами научной специальности 2.6.16 Технология производства изделий текстильной и легкой промышленности.

Публикации. Основные теоретические и прикладные результаты диссертационного исследования опубликованы в 128 печатных работах, в том числе 28 статей в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК, 10 - в научных изданиях, индексируемых в международной базе данных Scopus, 8 – в других научных журналах, в 3 монографиях, 2 патентах на изобретения и полезные модели, 71 - в материалах конференций и 6 учебных пособиях.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 5 глав, выводов по главам и заключения, библиографического списка и приложений. Работа изложена на 425 страницах машинописного текста без учета приложений, содержит 205 рисунков и 54 таблицы. Список литературы включает 430 библиографических и электронных источников. Приложения представлены на 88 страницах.

ГЛАВА 1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ФОРМИРОВАНИЯ И ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА СПЕЦИАЛЬНОЙ ОБУВИ

Задачи предприятий лёгкой промышленности по достижению высоких показателей энергосбережения, снижению трудоемкости технологических процессов и оптимизации затрат на материалы для выпуска качественной, конкурентоспособной продукции [196] могут быть успешно реализованы при строгом соблюдении требований производственной и экологической безопасности.

Решение вопросов обеспечения производственной безопасности различных категорий трудящихся в Российской Федерации опирается на законодательные акты, составляющие нормативно-правовую основу для развития системы государственного управления охраной труда.

Защита работников различных профессий от вредных и опасных воздействий, профилактика профессиональных заболеваний и травм сотрудников тех [175] или иных производств определяется спецификой их деятельности [85].

Постоянный спрос на спецодежду и спецобувь обуславливают ежегодное обновление их ассортимента, а также обязательное снабжение персонала СИЗ при вредных условиях труда [18, 39, 78-79, 175, 177-179].

СИЗ включают в себя специальные одежду и обувь, изолирующие костюмы, средства защиты органов дыхания, рук, головы, лица, органов слуха, глаз, различные предохранительные приспособления и др.

По экспертным оценкам рост рынка СИЗ за последние годы составлял примерно 10% ежегодно. Этому способствовало появление новых нормативов в сфере охраны труда, усиление требований к качеству СИЗ, развитие законодательной базы и другие меры [175], которые стимулировали производителей с одной стороны повышать качество продукции, в том числе специальной, с другой – обеспечивать комфортные и благоприятные условия труда. Кроме того, Минпромторг включил в план по импортозамещению в легкой промышленности ряд проектов [175], направленных на разработку и производство

спецодежды и спецобуви, что также положительно отразится на спросе на эти изделия. Все предпринимаемые меры способствуют стабильному спросу на продукцию индустрии [18, 39, 79, 175, 177-179]. Сегодня Россия крупнейший потребитель спецобуви и СИЗ в мире (наряду с Китаем и США). К 2025 году Минпромторг прогнозирует рост рынка на 40% благодаря активной господдержке индустрии и массовому импортозамещению [175].

Вместе с тем, импортозамещение в этой сфере, по мнению многих специалистов, может перечеркнуть все достигнутые результаты и успехи, поскольку качество отечественных СИЗ далеко не всегда соответствует не только импортным аналогам, но и российским законодательным нормативам.

Настоящая работа вносит существенный вклад в совершенствование таких нормативно-правовых документов как ГОСТ EN 50321-1-2023 «Система стандартов безопасности труда. Средства индивидуальной защиты ног. Обувь специальная для защиты от поражения электрическим током. Часть 1. Обувь и бахилы диэлектрические. Технические требования и методы испытаний» [33]; ГОСТ Р EN ИСО 20347-2013 «Национальный стандарт Российской Федерации. Система стандартов безопасности труда. Средства индивидуальной защиты ног. Обувь специальная. Технические требования» [19]; ГОСТ 12.4.076-90 «Система стандартов безопасности труда. Материалы для специальной кожаной обуви. Номенклатура показателей качества» [43]; ГОСТ 12.4.127-83 «Межгосударственный стандарт. Система стандартов безопасности труда. Обувь специальная. Номенклатура показателей качества» [44]; ГОСТ 28507-99 «Обувь специальная с верхом из кожи для защиты от механических воздействий. Технические условия» [162]; ГОСТ 12.4.137-2001 «Обувь специальная с верхом из кожи для защиты от нефти, нефтепродуктов, кислот, щелочей, нетоксичной и взрывоопасной пыли. Технические условия» [28] на основе разработки и реализации теоретических положений принципиально новых для прогнозирования технологических процессов производства специальной антистатической обуви, обладающей современными и актуальными для российского потребителя социально-экономическими свойствами, отвечающими условиям эксплуатации.

1.1. Антистатическая обувь, как предмет исследования

Качество продукции является наиболее значимым слагаемым в решении проблемы повышения эффективности общественного производства [342].

Обувные и кожгалантерейные предприятия [159, 201, 203] отрасли производят широкий ассортимент товаров потребительского, производственно-технического и специального назначения. Согласно Сводной стратегии развития обрабатывающей промышленности Российской Федерации до 2030 года и на период до 2035 года» (Распоряжение Правительства РФ от 06.06.2020 N 1512-р (ред. от 07.11.2023) [3] наряду с другими приоритетными группами продукции легкой промышленности значатся «Обувь и изделия из кожи», «Спецодежда». «Из-за высокой конкуренции на потребительском рынке значительная часть предприятий легкой промышленности (около 40%) ориентирована на производство продукции, связанной с государственным оборонным заказом, корпоративным сегментом, в том числе в части средств индивидуальной защиты» [3].

В номенклатуре специальной обуви антистатическая обувь, технология производства и качество которой постоянно совершенствуются, занимает определенную нишу [69, 147].

Сегодня нет определенной ясности относительно номенклатуры показателей качества обуви, в том числе антистатической, отсутствуют или недостаточно разработаны способы и средства измерения целого ряда показателей. Не вполне изучены факторы, обеспечивающие проектирование рациональных параметров конструкции обуви. Нуждаются в дальнейшем развитии и теоретическом обосновании вопросы оптимизации конструктивно-технологических параметров различных участков обуви с учетом свойств материалов, используемых для их изготовления [131].

Требования, предъявляемые к обуви, обусловлены ее назначением, условиями эксплуатации и другими факторами [61]. Основными являются социальные, функциональные, эргономические, эксплуатационные (требования надежности), эстетические.

Социальные требования предусматривают соответствие производства обувных товаров общественным потребностям, состоятельность их производства и потребления. Выявить требования социального назначения позволяют анализ статистических показателей, разработка моделей потребления, проведение социологических исследований.

Функциональные требования – это требования к выполнению обувью ее основной функции – защищать ноги человека от механических повреждений, переохлаждения, перегрева и других внешних воздействий.

Эргономические требования предусматривают удобство пользования изделием в процессе эксплуатации, его соответствие особенностям организма человека, обеспечение оптимальных условий его эксплуатации. Эргономические требования к обуви определяют ее соответствие гигиеническим, антропометрическим, физиологическим, психологическим особенностям организма человека [389].

В рамках настоящей работы интерес представляют гигиенические свойства. Нельзя сказать, что сегодня имеется система четких критериев оценки гигиенических свойств как обуви в целом, так и материалов ее деталей. А.Д. Зайончковский [387] считает, что можно выделить две группы таких критериев. Первая группа или не зависит от свойств материалов верха, или зависит от них в малой степени и определяется в основном конструкцией обуви [388]. К ней относятся внутренние размеры и форма обуви, гибкость, масса. Во второй группе – показатели, которые связаны не только с конструкцией, но и со свойствами материалов верха: тепло- и влагозащитные, паро- и воздухопроницаемость, электризуемость, санитарно-токсикологические свойства материалов наружных и внутренних деталей обуви. Институтом общей и коммунальной гигиены имени А.Н. Сысина [129] предложено оценивать материалы и обувь по физико-гигиеническим, физиолого-гигиеническим, санитарно-химическим и санитарно-токсикологическим свойствам.

Физико-гигиенические исследования направлены на изучение тепло- и влагозащитных, влаго-, электропроводных и др. свойств. Остановимся на общей

характеристике электропроводных свойств обуви. Из источников, представляющих классику технологической науки [128, 129], следует, что «выделение повышенного количества пота при эксплуатации обуви из искусственных материалов» связано не только с тепло- и массопроводными свойствами обувных материалов, но и с влиянием на кожу стопы статического электричества [130]. Установлено [128], что при трении стопы о стельку и подошвы об опору на всех трущихся поверхностях образуются и накапливаются заряды статического электричества [114], величина и знак которых зависят от химической природы и влажности материалов, а также от интенсивности их взаимодействия. На поверхностях при трении возникают заряды до 300 кВ/м (при санитарной норме 20 кВ/м). При использовании одежды и обуви наэлектризованностью более 20 кВ/м, у людей нарушается деятельность различных органов.

При эксплуатации изделий из кожи и тканей на основе натуральных волокон электризация незначительна из-за наличия в этих гидрофильных материалах влаги и быстрого стекания зарядов. Такие материалы заряжаются положительно, а кожа человека – отрицательно. По данным отечественных и зарубежных исследователей, электризация материалов вызывает накопление на их поверхности пыли и бактерий. Большинство бактерий несет отрицательный заряд, поэтому положительно заряженные материалы в большей степени заражаются бактериями.

В связи с этим рекомендуется использовать в обуви материалы, обеспечивающие стекание зарядов статического электричества или имеющие небольшую величину заряда, но обязательно отрицательного. Целесообразно наряду с сильно электризующимися материалами задействовать электропроводные, экранирующие образующиеся заряды. Конструкция обуви не должна допускать высокой амплитуды при трении стопы о стельку и подкладку, поэтому предлагаются формованные стельки, подкладочные материалы с гладкой поверхностью и т.д.

Антистатическая обувь [185-191], предназначенная для обеспечения безопасности и защиты оборудования, а также соблюдения стандартов качества и чистоты, используется персоналом, работающим с высокоточным оборудованием,

где необходима защита электронных компонент («чистые помещения») и устройств от электростатических явлений, сотрудниками химических лабораторий, врачами-хирургами (для предотвращения поражения статическим электричеством оперируемых больных через металлический инструмент) и т.д.

В связи с этим отметим, что нефтегазовый комплекс является базовой отраслью экономики России. На Российскую Федерацию приходится 88% запасов и 86% добычи углеводородов, при этом основная деятельность сосредоточена на территориях Северо-Западного, Приволжского, Уральского и Южного федеральных округов. Анализ производственных условий предприятий нефтегазовой отрасли, как наиболее крупной и интенсивно развивающейся, показал, что наличие распределенных электрических зарядов, которые создают электростатические поля, разряды которых способны зажигать горючие газы, пары или пыль, находящиеся в воздушной среде, обуславливают высокую электростатическую опасность. Детонации взрывов и возникновения пожаров приводят к трагическим последствиям, в результате которых наносится значительный ущерб производству.

Искрообразование от воздействия статического электричества и постоянного электрического поля при работе с нефтепродуктами в условиях Крайнего Севера представляет особую опасность отчасти из-за низкой влажности. В таких климатических условиях влажность воздуха часто становится достаточно низкой, особенно в зимний период. Это приводит к увеличению электростатического заряда, так как сухой воздух обладает слабой диэлектрической проницаемостью, что способствует накоплению статического электричества на поверхности материалов и оборудования.

Наряду с пожарной опасностью, статическое электричество как один из факторов окружающей среды, опасно и для работающих. Легкие «уколы» при работе с сильно наэлектризованными материалами вредно влияют на психику работающих и в определенных ситуациях могут способствовать травмам на технологическом оборудовании [428]. Мощные искровые разряды, возникающие, например, при затаривании гранулированных материалов, могут приводить к

болевым ощущениям. Воздействия статического электричества могут явиться причинами развития неврастения, головной боли, плохого сна, раздражительности, покалываний в области сердца и т.д. Кроме того, при постоянном прохождении через тело человека, которое является проводником, малых токов электризации, возможны неблагоприятные физиологические изменения в организме, приводящие к профессиональным заболеваниям. Систематическое воздействие электростатического поля повышенной напряженности может вызывать функциональные отклонения в центральной нервной, сердечно-сосудистой и других системах организма [428].

Накопление статического электричества происходит при движении человека [69]: при ходьбе, прикосании к одежде, оборудованию и т.д. Таким образом, при определенных условиях на теле может скапливаться заряд, который приводит к появлению электрического напряжения в десятки тысяч вольт. Следовательно, процессы, протекающие в производственных условиях, могут повысить риск чрезвычайной ситуации. Такие стандарты, требования и регламенты безопасности при взаимодействии человека с электроникой как: ГОСТ Р 53734.4.2-2015 [10], ГОСТ 12.4.124-83 [11], ГОСТ ИЕС 61340-4-1-2017 [12], ГОСТ ИЕС 61340-4-3-2020 [13], ГОСТ ИЕС 61340-4-5-2020 [14], ГОСТ ИЕС 61340-4-9-2021 [15], ГОСТ ИЕС 61340-5-1-2019 [16], ГОСТ ИЕС TR 61340-5-2-2021 [17], ГОСТ Р ЕН ИСО 20345-2011 [18], ГОСТ Р ЕН ИСО 20347-2013 [19], ГОСТ Р 53734.3.1-2013 [20], ТР ТС 007/2011 [21], ТР ТС 019/2011 [22], ТР ТС 017/2011 [23], СанПиН 1.2.3685-21 [52] указывают на наличие целой системы защиты от электростатических зарядов, в которой одним из важнейших средств значится антистатическая обувь.

Выбор и применение СИЗ работающих, к которым относится специальная обувь, должны основываться на принципах обеспечения адекватной защиты работников от фактических вредных и опасных производственных факторов, находящихся на рабочих местах. При поверхностном подходе к составлению требований к защитным, эргономическим и эксплуатационным характеристикам закупаемой обуви, без учета оценки фактических условий эксплуатации, может вызвать следующие потенциальные для работодателя риски:

- экономические потери, связанные с травматизмом и выплатами по листам о нетрудоспособности;
- снижение производительности труда работников, связанное с использованием не эргономичной обуви;
- угроза острых и прогрессирующих профессиональных заболеваний;
- потери, связанные с преждевременным списанием спецобуви, не отвечающей по качественным характеристикам реальным условиям эксплуатации;
- экономические потери, связанные с выбором спецобуви, имеющей недостаточный набор защитных свойств.

Понятие «качество» в отношении спецобуви подразумевает, как минимум три характеристики:

- соответствие защитных свойств реальным угрозам здоровью работников и специфике условий труда;
- удобство пользования, эргономичность;
- прочность и долговечность, определяемые качеством и технологией изготовления, качеством материалов и комплектующих конструкции.

Качество продукции – это совокупность свойств продукции, обуславливающих ее пригодность удовлетворять определенные потребности в соответствии с ее назначением [84, 88, 175, 180].

Репутация компании, длительность ее работы на рынке специальной обуви, наличие собственных производственных мощностей, оснащенных современным оборудованием, постоянное совершенствование технологических процессов и внедрение инноваций, рационализация системы контроля качества продукции являются гарантией того, что специальная обувь такого производителя соответствует всем необходимым требованиям [181, 182, 175].

Спецобувь изготавливается согласно официально принятым стандартам качества. Аналогом стандарта Евросоюза по методам испытания спецобуви EN ISO 20344 [269] в России является ГОСТ 12.4.127-83 [44], который распространяется на специальную обувь из кожи и полимерных материалов. Показатели качества подразделяют на:

- общие (применяемые для всех классификационных групп с учетом конкретных типов обуви и применяемого материала). Например, физико-механические, эргономические, гигиенические, физиологические, антропометрические, а также показатели надежности и транспортабельности.

- специальные (применяемые только для некоторых групп). К ним относят обувь, которая защищает от механических воздействий (удары, порезы, проколы, истирание, вибрация), скольжения, повышенных и пониженных температур, радиоактивных загрязнений, электрического тока, влаги, токсичных веществ, общих производственных загрязнений, вредных биологических факторов и статических нагрузок.

В общем случае качество обуви определяют две группы факторов:

1. Непосредственно связанных с ее изготовлением (производственные):

- качество исходного сырья, материалов, комплектующих деталей [154];
- конструкция, включая дизайн [161], качество проектирования [152, 381] и моделирования;
- качество технологических процессов [202, 413], включая качество научно-технической документации, оборудования, труда работников.

2. Способствующие сохранению свойств обуви на пути к потребителю (постпроизводственные):

- упаковка и маркировка;
- условия транспортирования;
- условия хранения;
- условия реализации и эксплуатации обуви.

По природе воздействия все факторы, вызывающие изменения потребительских свойств обуви, подразделяются на:

- физико-химические (влажность, температура, свет, кислород);
- механические (удары, давление, трение);
- биологические (микроорганизмы - гнилостные бактерии, плесневые грибы; насекомые - моль, жук-кожед; грызуны).

Необходимо отметить, что не вся специальная обувь, в частности антистатическая, обладает одинаковыми свойствами после изготовления. Вопрос сохранения функциональных характеристик обуви за время ее хранения требует глубокого научного подхода и понимания факторов, влияющих на деградацию материалов [185, 192].

Следует учитывать, что многие типы специальной обуви изготавливаются из полимерных и композитных материалов, которые подвергаются старению под воздействием таких внешних факторов, как температура, влажность и ультрафиолетовое излучение. При длительном хранении на складах эти факторы могут приводить к изменению структурных свойств материалов и повлечь за собой их деградацию, что, в свою очередь, снижает не только эффективность выполнения ими антистатических или защитных функций [390, 391], но и функциональность конструкции изделия в целом.

Не менее важным является влияние атмосферных условий на состояние обуви: высокая влажность может способствовать развитию плесени и гнилостных процессов, в то время как повышенные температуры могут вызывать термическую деформацию и потерю упругости.

Потребительские свойства товаров, в том числе и обуви специальной, могут значительно ухудшаться при наличии функциональных дефектов и дефектов конструкции [87, 184].

Исследованию физических характеристик ЭСП посвящены многие работы [4-9, 54], но отсутствие в настоящее время теоретических моделей и информационных баз знаний, позволяющих надежно прогнозировать антистатические показатели обуви [327], характер поведения и стекания электростатических зарядов с тела человека, взаимодействия в системе «обувь – человек – окружающая среда» вызывает необходимость обратиться к основополагающим нормативным документам, регламентирующим область применения и производство специальной обуви.

1.2. Основные стандарты, регламентирующие применение и производство специальной обуви, в том числе антистатической

Одной из главных задач стандартизации является обеспечение качества продукции. Стандартов, регулирующих производство и применение средств индивидуальной защиты, включая специализированную обувь, большое количество, и они охватывают различные требования, касающиеся безопасности, материалов, методов испытаний и условий эксплуатации. Эти стандарты необходимы для обеспечения надежности и защиты работников, занятых в условиях, сопряженных с повышенным риском [69].

Ниже приведены основные ГОСТы [28, 31-44, 162], которыми руководствуются предприятия при производстве специальной обуви (табл. 1.1.) [69]:

Табл. 1.1. Перечень основных действующих государственных стандартов, регламентирующих применение средств индивидуальной защиты (СИЗ) ног работников (специальной обуви)

Нормативный правовой акт	Наименование нормативного правового акта	Область применения
1	2	3
ГОСТ Р ИСО 17697-2014	Национальный стандарт Российской Федерации. Обувь. Методы испытаний верха, подкладки и вкладных стелек. Прочность швов	Устанавливает методы испытаний для определения прочности швов верха, подкладки и вкладных стелек обуви для оценки ее соответствия конечному применению вне зависимости от вида материала, из которого она изготовлена.
ГОСТ Р ИСО 20869-2011	Национальный стандарт Российской Федерации. Обувь. Метод испытания подошв, стелек, подкладок и вкладных стелек. Определение содержания водорастворимых веществ	Устанавливает метод определения содержания водорастворимых веществ в подошвах, стельках, подкладках и вкладных стельках.
ГОСТ EN 50321-1-2023	Система стандартов безопасности труда. Средства индивидуальной защиты ног. Обувь специальная для защиты от поражения электрическим током. Часть 1. Обувь и бахилы диэлектрические. Технические требования и методы испытаний	Устанавливает требования и методы испытаний для специальной обуви, используемой в качестве диэлектрической обуви и бахил, которые обеспечивают защиту работника от поражения электрическим током, и используемой для работы с частями, находящимися

1	2	3
		под напряжением, или вблизи токоведущих частей установок до 36 000 В переменного тока (АС) или 25 500 В постоянного тока (DC).
ГОСТ 12.4.270-2014	Межгосударственный стандарт. Система стандартов безопасности труда. Обувь специальная дезактивируемая с текстильным верхом для работ с радиоактивными и химически токсичными веществами. Общие технические требования и методы испытаний	Распространяется на специальную дезактивируемую обувь с текстильным верхом, предназначенную для повседневного использования при работах с радиоактивными и химически токсичными веществами (далее — спецобувь).
ГОСТ 12.4.032-95	Межгосударственный стандарт. Обувь специальная с кожаным верхом для защиты от действия повышенных температур. Технические условия	Распространяется на специальную обувь с верхом из кожи, предназначенную для защиты ног работающих от теплового излучения, контакта с нагретыми поверхностями, искр, брызг расплавленного металла.
ГОСТ 12.4.242-2013	Межгосударственный стандарт. Система стандартов безопасности труда. Обувь специальная дополнительная для работ с радиоактивными и химически токсичными веществами. Общие технические требования и методы испытаний	Распространяется на специальную дополнительную обувь, надеваемую поверх основной спецобуви для защиты ног и основной обуви работающего от радиоактивных и химически токсичных веществ.
ГОСТ Р ЕН ИСО 20347-2013	Национальный стандарт Российской Федерации. Система стандартов безопасности труда. Средства индивидуальной защиты ног. Обувь специальная. Технические требования	Распространяется на обувь специальную и устанавливает основные и дополнительные технические требования к обуви, условия использования которой не предполагают наличие возможных механических рисков, например, ударов и сжатия. Стандарт не распространяется на обувь для пожарных; диэлектрическую; для защиты от цепной пилы; для защиты от химических веществ; для защиты от выплесков металлов; для мотоциклистов.
ГОСТ 34734-2021	Средства индивидуальной защиты ног пожарного. Общие технические требования. Методы испытаний	Устанавливает общие технические требования и методы испытаний средств индивидуальной защиты ног пожарного и материалов, используемых для их изготовления. Распространяется на средства индивидуальной защиты ног пожарного, а именно обувь специальную, предназначенную для защиты ног пожарных от механических воздействий, повышенных температур, открытого

1	2	3
		пламени, воды, химических и климатических воздействий при тушении пожаров и проведении связанных с ними аварийно-спасательных работ.
ГОСТ 12.4.103-2020	Система стандартов безопасности труда. Одежда специальная защитная, средства индивидуальной защиты ног и рук. Классификация	Распространяется на специальную защитную одежду, средства индивидуальной защиты ног и рук и устанавливает их классификацию.
ГОСТ 12.4.129-2001	Система стандартов безопасности труда. Обувь специальная. Средства индивидуальной защиты рук. Одежда специальная и материалы для их изготовления. Метод определения проницаемости нефти и нефтепродуктов	Распространяется на специальную кожаную обувь; средства индивидуальной защиты рук, кроме средств защиты рук, изготовленных методом макания: специальную одежду и материалы для их изготовления и устанавливает метод определения проницаемости нефти и нефтепродуктов.
ГОСТ Р 12.4.217-2000	Система стандартов безопасности труда. Обувь специальная кожаная. Метод определения проницаемости органических растворителей	Распространяется на специальную обувь с верхом из натуральной, искусственной и синтетической кожи и устанавливает метод определения проницаемости органических растворителей.
ГОСТ Р 12.4.187-2024	Система стандартов безопасности труда. Обувь специальная для защиты от общих производственных загрязнений. Технические условия	Распространяется на специальную обувь для защиты ног работающих от общих производственных загрязнений. Не распространяется на обувь из резины и полимерных материалов.
ГОСТ 12.4.076-90	Система стандартов безопасности труда. Материалы для специальной кожаной обуви. Номенклатура показателей качества	Распространяется на натуральную, искусственную и синтетическую кожу для верха, а также натуральную кожу и синтетические материалы для низа специальной обуви и устанавливает номенклатуру показателей качества этих материалов.
ГОСТ 12.4.127-83	Межгосударственный стандарт. Система стандартов безопасности труда. Обувь специальная. Номенклатура показателей качества	Распространяется на специальную обувь из кожи и полимерных материалов и устанавливает номенклатуру показателей качества этой обуви. Показатели качества подразделяются на: общие — применяемые для всех классификационных групп с учетом конкретных типов обуви и применяемого материала; специализированные — применяемые только для некоторых групп.

1	2	3
ГОСТ 28507-99	Обувь специальная с верхом из кожи для защиты от механических воздействий. Технические условия	Распространяется на специальную обувь с верхом из кожи, предназначенную для защиты ног от механических воздействий.
ГОСТ 12.4.137-2001	Обувь специальная с верхом из кожи для защиты от нефти, нефтепродуктов, кислот, щелочей, нетоксичной и взрывоопасной пыли. Технические условия	Распространяется на специальную обувь с верхом из кожи, предназначенную для защиты ног работающих от сырой нефти, нефтяных масел и нефтепродуктов тяжелых фракций, кислот и щелочей концентрации до 20 %, нетоксичной и взрывоопасной пыли.

Проведя анализ табл. 1.1 можно сказать, что адаптация к многочисленным стандартам, регулирующим производство и применение СИЗ, в частности специализированной обуви, представляет собой сложную задачу. Текущая ситуация с многообразием действующих ГОСТов в области СИЗ создает определенные сложности для предприятий, стремящихся следовать всем нормам и требованиям. Каждый стандарт регламентирует специфические параметры, такие как пластичность, прочность на разрыв, устойчивость к химическим веществам и другие характеристики, что делает процесс их применения и интерпретации достаточно трудоемким и требующим тщательного анализа. Такое многообразие стандартов отражает необходимость комплексного подхода к безопасности: от определения требований к материалам и конструкции обуви до методов тестирования и сертификации.

Помимо соответствия отечественным стандартам производители стремятся, чтобы их продукция соответствовала и европейским нормам [53]. Стандарт EN ISO 20345:2007 [46] (табл. 1.2.) является эталоном классификации спецобуви по классам защиты во многих странах мира. Вся спецобувь: ботинки, полуботинки, сандалии, сапоги и прочая защитная спецобувь, проходят тщательный контроль качества. Стандарт устанавливает минимальные требования, которые должны учитываться производителями в обязательном порядке [69].

Табл. 1.2. Показатели специальной обуви и классы защиты [46]

Показатель	Класс защиты			Обозначение
	S1 (антистатическая)	S2 (водостойкость)	S3 (антипрокол)	
Стальной подносок, выдерживающий удар до 200 Дж	+	+	+	
Антистатическая подошва	+	+	+	A
Поглощение энергии в области свода стопы*	+	+	+	E
Стойкость подошвы к нефтепродуктам	+	+	+	
Водопоглощение, макс. 30%	+	+		
Водостойкость	+	+	WRU	
Антипрокольная стальная стелька**	+	P		
*«Смягчение» удара стопы о твердую поверхность. **Может устанавливаться в обуви класса защиты S1 и S2.				

К появлению статического разряда могут привести одежда, различные предметы и материалы, а также климатические факторы. Такая особенность не только неприятна сама по себе, но и опасна при работе с легковоспламеняющимися материалами. Антистатическая обувь может значительно снизить риск подобных ситуаций и, согласно стандарту [46] и обеспечивать электрическое сопротивление низа в диапазоне от 100кОм до 1000 МОм.

Предупреждению возникновения опасных зарядов статического электричества на поверхности оборудования, обрабатываемых материалов, а также поверхности тела работающих, служат условия, способствующие стеканию возникающих зарядов статического электричества. Создание постоянного электрического контакта тела человека с заземленными конструкциям оборудования – один из способов устранения зарядов. Универсальным способом заземления человека (персонала) является связка «обувь – напольное покрытие» [155, 69].

Антистатическая обувь обеспечивает безопасность жизни и здоровья людей, защищает дорогостоящее оборудование и чувствительные материалы.

Для объективной оценки качества изделий обувной промышленности действует ряд государственных стандартов, технических условий на требования к продукции, методы ее испытания, показатели качества [30, 51].

Государственная система стандартизации, созданная в Российской Федерации, позволяет предприятиям и министерствам устанавливать высокие требования к качеству и контролировать их соблюдение на всех стадиях разработки, производства и эксплуатации изделия. Стандартизация базируется на достижениях науки, техники, практическом опыте и определяет основу не только настоящего, но и будущего развития промышленности [165].

На сегодняшний день в области охраны труда и техники безопасности, особенно в контексте специальной обуви, действуют различные классификации специальной обуви [19, 39]. Тем не менее, следует подчеркнуть, что, несмотря на наличие стандартов и норм, касающихся электрического сопротивления, специализированной классификации обуви, учитывающей диапазоны электрического сопротивления, до сих пор не разрабатывалось.

Документами, нормирующими электростатическое сопротивление обуви [65, 66], являются:

- ГОСТ 12.4.124-83 «Средства защиты от статического электричества. Общие технические требования» [11], ТР ТС 019/2011 «О безопасности средств индивидуальной защиты» [22], в которых указано, что электрическое сопротивление между подпятником (в соответствии с ГОСТ 23251-2023 «Обувь. Термины и определения» [351] подпятничником жестким и мягким - прим. автора) и ходовой стороной антистатической специальной обуви должно быть от 10^6 до 10^8 Ом;

- ГОСТ Р ЕН ИСО 20347-2013 «ССБТ. Средства индивидуальной защиты ног. Обувь специальная. Технические требования» [19] и ГОСТ Р ЕН ИСО 20345-2011 «ССБТ. Средства индивидуальной защиты ног. Обувь защитная. Технические требования» (п. 6.2.2) [18] по которым обувь можно разделить на группы:

1. Электрическое сопротивление электропроводной обуви, определяется в соответствии с пунктом 5.10 EN ISO 20344 [269] после кондиционирования в сухой

атмосфере (пункт 5.10.3.3) по ЕН ИСО 20344 [269]) электрическое сопротивление не должно быть выше 100 кОм;

2. Электрическое сопротивление антистатической обуви, определяется в соответствии с 5.10 ЕН ИСО 20344 [269] после кондиционирования в сухой и влажной атмосфере (5.10.3.3, а и b ЕН ИСО 20344) электрическое сопротивление должно быть $> 100 \text{ кОм} \leq 1000 \text{ МОм}$;

3. Электрическое сопротивление диэлектрической обуви, определяется в соответствии с 5.11 ЕН ИСО 20344 [269], должно соответствовать требованиям ЕН 50321, классу О (основная защита) или ОО (усиленная защита) по уровням электрического сопротивления;

- МЭК 61340-4-3:2017 «Электростатика. Часть 4-3. Стандартные методы испытаний для особых применений. Обувь» [63] согласно которому антистатическая обувь должна соответствовать международному классу защиты 2, обеспечивая электрическое сопротивление до 100 МОм в условиях как повышенной (60 ± 5) %, так и пониженной (25 ± 3) % влажности воздуха [66].

Нами разработана классификация обуви по диапазонам электрического сопротивления (рис. 1.1.), в которой материалы расположены в зависимости от уровня их проводимости, определяющего свойства в отношении статического электричества. Из рисунка видно, что по этому показателю выделяются материалы трех категорий: проводящие, рассеивающие (антистатические), диэлектрики и изоляционные материалы. В классификации указаны стандарты, которые определяют требования к этим материалам, по этому показателю они распределены. Отметим, что обувные материалы чаще всего являются диэлектриками, то есть находятся в правой зоне – от 10^9 степени и выше.

Тогда, хотя к этому явно нигде не апеллируют, оказывается вполне логичным выделение в соответствующей нормативной документации конструкций антистатической обуви и групп материалов ее составляющих по показателям предложенной классификации. Обратимся с позиций необходимости гармонизации к соответствующим, регламентирующим электростатическую безопасность СИЗ источникам.

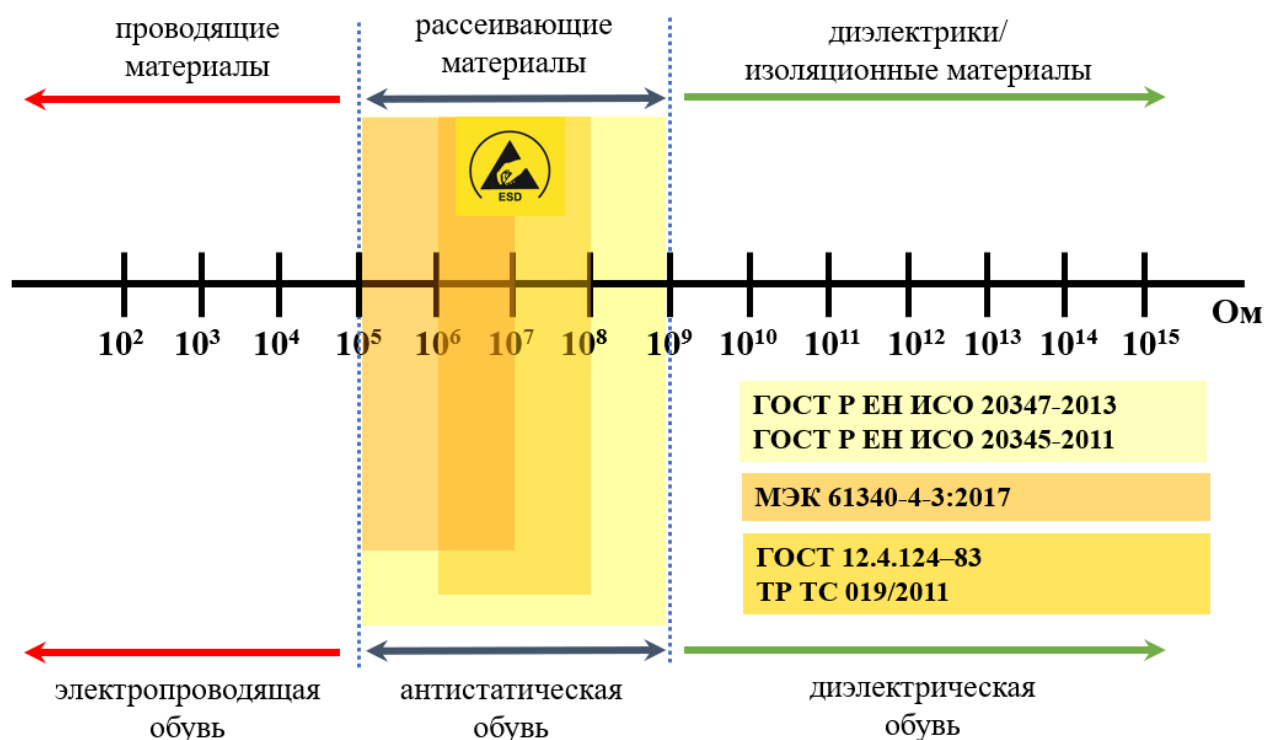


Рис. 1.1. Классификация обуви по диапазонам электрического сопротивления [66]

Электропроводящая обувь (conductive footwear) - обувь, сопротивление которой при измерении в соответствии с п. 5.10 EN ISO 20344 [269] находится в диапазоне от 0 до 100 кОм.

Каждая пара электропроводящей обуви сопровождается листком (вкладышем) со следующим текстом:

электропроводящая обувь должна использоваться в тех случаях, когда необходимо минимизировать электростатический заряд за короткий промежуток времени, например, при работе со взрывчатыми веществами. Электропроводящая обувь не должна использоваться в случаях, когда риск удара током от любого электрического аппарата или токоведущих частей полностью не исключен [100]. Для того, чтобы подтвердить электропроводные свойства обуви, необходимо, чтобы верхний предел измеренного электрического сопротивления не превышал 100 кОм для новой обуви [65].

При эксплуатации электрическое сопротивление обуви, изготовленной из электропроводного материала, может значительно измениться из-за сгибов и загрязнений, поэтому необходимо удостовериться в том, что изделие способно

выполнять свои функции рассеивания электростатического заряда в течение всего срока службы. При необходимости пользователю рекомендуются испытания на определение электрического сопротивления и в последующем осуществлять их регулярно. Подобные и нижеследующие испытания должны стать общепринятой практикой по предотвращению несчастных случаев на рабочем месте.

Если обувь используется в условиях, при которых материал подошвы загрязняется веществами, повышающими ее электрическое сопротивление, потребитель должен всегда проверять электрические свойства перед входом в опасную зону.

При использовании электропроводящей обуви сопротивление напольного покрытия должно быть таким, чтобы оно не мешало ее функционированию [65].

Никакие изолирующие материалы при использовании такой обуви, за исключением обычных чулочных изделий, не должны находиться между вкладной стелькой обуви и ногой потребителя. В противном случае должны быть проверены электрические свойства комбинации обуви/вставка.

Антистатическая обувь (antistatic footwear) - обувь, сопротивление которой при измерении в соответствии с 5.10 EN ISO 20344 [269] более 100 кОм, но менее 1000 МОм [65].

Каждая пара антистатической обуви сопровождается листовкой со следующим текстом:

антистатическая обувь должна использоваться при необходимости снижения ЭСП путем рассеивания электростатического заряда, тем самым минимизируя риск возникновения искрового зажигания, например, от воспламеняющихся веществ и испарений. Необходимо заметить, однако, что антистатическая обувь не может гарантировать достаточную защиту от электрического удара током, так как она обеспечивает сопротивление между полом и ногой. Если риск электрического удара не полностью исключен, требуются дополнительные меры для его исключения. Такие меры также, как и дополнительные нижеприведенные тесты, должны стать общепринятой практикой по предотвращению несчастных случаев на рабочем месте.

Опыт показал, что с целью снижения статического электричества траектория разряда через изделие обычно имеет электрическое сопротивление менее 1000 Ом в течение всего срока полезного использования. Значение 100 кОм определяется как низший предел сопротивления нового изделия для обеспечения некоторой защиты от опасного электрического удара или внезапного отказа любого электроприбора, который становится неисправным при работе под напряжением вплоть до 250 В. Однако в определенных условиях потребители должны знать, что обувь может и не гарантировать достаточную защиту от высокого напряжения, и, поэтому, всегда необходимо предусматривать дополнительные «хауберк»-средства [65]. Электрическое сопротивление обуви такого типа может значительно измениться из-за сгибов, загрязнений или влаги; обувь не будет выполнять свою главную функцию в условиях высокой влажности. Однако необходимо удостовериться, что изделие способно выполнять предписанные ему функции рассеивания электростатического заряда и защиты в течение всего срока службы. Пользователю рекомендуется периодически проводить тесты на электрическое сопротивление согласно установленному регламенту.

При длительной носке обувь может впитывать влагу, а во влажных и мокрых условиях она приобретает свойства проводящей.

Там, где пользуются антистатической обувью, сопротивление напольного покрытия должно соответствовать нормам, установленным для конкретных производственных помещений [12, 14, 53, 65, 70].

Диэлектрическая обувь (electrically insulating footwear), обувь с изоляционными свойствами – это обувь для защиты от поражения электрическим током, предотвращающая его прохождение по телу через ноги, ограниченно защищает от случайного контакта с неисправным электроприбором [65]. Каждая пара такой обуви должна сопровождаться вкладышем следующего содержания:

а) диэлектрическая обувь должна быть надета, если существует опасность электрического удара, например, от работающего неисправного электроприбора;

б) диэлектрическая обувь не может гарантировать 100%-ной защиты от поражения электрическим током. Во избежание этого риска необходимы

дополнительные меры, которые так же, как и ниженазванные испытания, должны стать общепринятой практикой программы оценки риска;

в) электрическое сопротивление обуви должно отвечать пункту 6.3 требованиям 6.3 ЕН 50321 в любое время срока службы обуви. Этот уровень защиты может быть нарушен по следующим причинам:

1) на обуви появились царапины, надрезы, потертости или химические загрязнения;

2) обувь впитала влагу из-за продолжительной носки или использования во влажных и мокрых условиях;

3) загрязненная, например, подошва химикатами.

Поэтому пользователям рекомендуется регулярно осматривать обувь, а изношенную и/или поврежденную не применять в рабочих условиях. Для проверки обуви на наличие электроизоляционных свойств использовать подходящее тест-оборудование.

В соответствии с ГОСТ 12.4.124-83 «Средства защиты от статистического электричества» (п. 2.11.1.) [11] и принятым регламентом Таможенного союза ТР ТС 019/2011 «О безопасности средств индивидуальной защиты» [22] антистатической считается такая обувь, у которой электрическое сопротивление между подпятником (внутри обуви) и ходовой стороной подошвы (снаружи обуви) находится в пределах $10^6 - 10^8$ Ом [165].

При производстве антистатической обуви, согласно нормативной документации, должны проводиться:

- приемочные испытания на стенде для измерения сопротивления низа обуви [13];

- оценка электростатических свойств обуви и напольного покрытия в комбинации с человеком [165].

Если антистатическая одежда является частью системы заземления, то общее сопротивление системы, включающее сотрудника, одежду и провод заземления, должно быть менее $3,5 \cdot 10^7$ Ом [14].

Согласно требованиям Международной электротехнической комиссии (МЭК), которые утверждены в виде ГОСТ IEC 61340-4-3-2020 [13], антистатическая рассеивающая обувь должна иметь электрическое сопротивление от 10^5 до 10^8 Ом.

В «чистых помещениях» [165] должна применяться система заземления, а также широкий спектр материалов и изделий, предназначенных для предотвращения образования и/или распространения сформированных электростатических зарядов для защиты от повреждения чувствительных к нему компонентов [16].

Устраняют электрические заряды с тела человека помимо антистатической обуви и дополнительные средства защиты: антистатические халаты и браслеты. Стандарт ГОСТ IEC 61340-4-6-2019 «Электростатика. Методы испытаний для прикладных задач. Антистатические браслеты» [48] содержит описание электрических и механических испытаний, устанавливающих предельные характеристики заземляющих браслетов, где электрическое сопротивление должно быть в диапазоне от 10^5 до 10^7 Ом [165].

В отдельную декларацию выделена антистатическая облегченная обувь для чистых помещений (тапочки), которая должна производиться в соответствии с ГОСТ Р 52538-2006 «Чистые помещения. Одежда технологическая. Общие требования» [49] и ГОСТ 12.4.124-83 «Средства защиты от статического электричества. Общие технические требования» [11]. Специальная одежда, специальная обувь, предохранительные антистатические приспособления обеспечивают защиту при работе с электроустановками напряжением до 1000 В.

ГОСТ 31613-2012 «Электростатическая искробезопасность. Общие технические требования и методы испытаний» [50] в соответствии с положениями ГОСТ 12.1.004-91 «Пожарная безопасность. Общие требования» [156], ГОСТ 12.1.010-76 «Взрывобезопасность. Общие требования» [157] и ГОСТ 12.1.018-93 «Пожаровзрывобезопасность статического электричества. Общие требования» [158] регламентируют общие технические требования и методы испытаний оболочек и других частей электрооборудования, специальной одежды и обуви,

конвейерных лент и вентиляционных труб, полностью или частично изготовленных из неметаллических материалов и электризующихся в процессе их применения во взрывоопасных зонах.

ГОСТ Р 12.4.187-2024 «Обувь специальная для защиты от общих производственных загрязнений. Технические условия» [42] и ГОСТ 28507-99 «Обувь специальная с верхом из кожи для защиты от механических воздействий. Технические условия» [162] распространяются на специальную обувь из натуральной, искусственной и синтетической кож и с комбинированным верхом для защиты ног работающих от общих производственных загрязнений и механических воздействий.

Наряду с этим Технические регламенты Таможенного Союза регламентируют допустимый уровень напряженности электростатического поля на поверхности изделия. Так, в соответствии с ТР ТС 019/2011 «О безопасности средств индивидуальной защиты» [22] (раздел 4.7, п. 9) ... «средства защиты рук, обувь и одежда, входящие в состав экранирующих СИЗ, должны иметь изоляцию тела человека от электропроводящих элементов, при этом электрическое сопротивление между токопроводящим звеном средств индивидуальной защиты от воздействия статического электричества и землей должно составлять от 10^6 до 10^8 Ом.

Согласно приложению 13 ТР ТС 007/2011 «О безопасности продукции, предназначенной для детей и подростков» (статья 6. Требования безопасности обуви и кожгалантерейных изделий, п. 5) напряженность электростатического поля на поверхности обуви не должна превышать 15 кВ/м [21].

В ТР ТС 017/2011 «О безопасности продукции легкой промышленности» не установлено требований как к напряженности ЭСП обуви, так и материалам для нее [23].

ГОСТ 12.4.172-2019 «Средства индивидуальной защиты от электрических полей промышленной частоты. Комплекты индивидуальные экранирующие. Общие технические требования. Методы испытаний» [37] распространяется на индивидуальные экранирующие комплекты (спецодежда, спецобувь, средства

защиты рук, лица), предназначенные для защиты работающих от воздействия электрических полей промышленной частоты закрытых распределительных устройств (ЗРУ), открытых распределительных устройств (ОРУ) и воздушных линий электропередачи (ВЛ). Стандарт устанавливает требования и методы испытаний индивидуальных экранирующих комплектов.

ГОСТ 12.4.283-2019 «Средства индивидуальной защиты от электрических полей промышленной частоты и поражения электрическим током. Комплекты индивидуальные шунтирующие экранирующие. Общие технические требования. Методы испытаний» [160]. Методы испытаний распространяется на индивидуальные защитные комплекты (спецодежда, спецобувь, средства защиты рук), предназначенные для защиты персонала, занимающегося обслуживанием либо ремонтом отключенного электрооборудования, которое может оказаться под наведенным напряжением. Стандарт устанавливает требования к защитным комплектам и методы их испытания.

ГОСТ 12.4.076-90 «Материалы для специальной кожаной обуви. Номенклатура показателей качества» распространяется на натуральную, искусственную и синтетическую кожи для верха, а также натуральную кожу и синтетические материалы для низа специальной обуви [43].

В ГОСТ 25937-83 «Материалы обувные. Метод определения удельных объемного и поверхностного электрических сопротивлений» дается описание установки и методики исследования для измерения электрических сопротивлений обувных материалов [29].

Обобщающим документом, регламентирующим правила использования антистатических предметов, является ГОСТ ИЕС 61340-5-1-2019 «Электростатика. Защита электронных устройств от электростатических явлений. Общие требования» [16]. Стандарт предписывает оснащение всей рабочей зоны антистатическим покрытием пола, или в минимальном варианте – напольным ковриком в радиусе ближней дистанции передвижения оператора. Обувь при этом должна обладать нормированной проводимостью для стекания заряда с ноги на проводящий коврик. Согласно нормам ГОСТ ИЕС 61340-5-1-2019 [16] проходное

сопротивление обуви должно быть в диапазоне от 750 кОм до 35 МОм, если цепочка «обувь – напольное покрытие» используется в качестве первичного (основного) средства заземления, или от 100 кОм до 100 МОм, если обувь используется в качестве вторичного (дополнительно к наручному браслету) средства заземления. При отсутствии полноценной антистатической обуви в качестве временной меры защиты от ЭСР следует пользоваться лодыжечными ремешками заземления или одноразовыми антистатическими ремешками.

Данные об основных действующих стандартах и регламентах, устанавливающих электрические показатели, влияющие на уровень поля и нормируемые значения ЭСП, представлены в таблицах 1.3 – 1.6 [69].

Таб. 1.3. Перечень основных нормативных документов, регламентирующих электростатические показатели обуви, одежды, напольных покрытий и внешней среды [10-15, 18-20]

Нормативный правовой акт	Наименование нормативного правового акта	Дата вступления в силу действующей редакции	Нормируемый показатель	Значение нормируемого показателя
1	2	3	4	5
ГОСТ Р 53734.4.2-2015 (IEC 61340-4-2:2013)	Электростатика. Часть 4-2. Методы испытаний для прикладных задач. Электростатические свойства одежды.	01.03.2016	Сила тока	300 МА
			потенциал модели человеческого тела (МЧТ)	100 В
ГОСТ 12.4.124-83	Система стандартов безопасности труда. Средства защиты от статического электричества. Общие технические требования	01.01.1984	Величина сопротивления заземляющего устройства	100 Ом
			Электрическое сопротивление	от 10^6 до 10^8 Ом
ГОСТ IEC 61340-4-3-2020	Электростатика. Методы испытаний для прикладных задач. Обувь	01.02.2021	Электрическое сопротивление	от $1 \cdot 10^5$ до $1 \cdot 10^8$ Ом

1	2	3	4	5
ГОСТ IEC 61340-4-5-2020	Электростатика. Методы испытаний для прикладных задач. Методы оценки электростатических свойств обуви и напольного покрытия в комбинации с человеком	01.02.2021	Электрическое сопротивление	10^6 Ом
ГОСТ IEC 61340-4-9-2021	Электростатика. Методы испытаний для прикладных задач. Одежда	01.09.2021	Электрическое сопротивление	$< 1,0 \cdot 10^9$ Ом
ГОСТ IEC 61340-4-1-2017	Электростатика. Методы испытаний для прикладных задач. Электрическое сопротивление напольных покрытий и установленных полов	01.08.2018	Электрическое сопротивление, включая сопротивление относительно земли, сопротивление от точки до точки и вертикальное сопротивление	от 10^4 до 10^{13} Ом
ГОСТ Р EN ISO 20345-2011	Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Средства индивидуальной защиты ног. Обувь защитная. Технические требования	01.07.2012	Электрическое сопротивление	100 кОм до 1000 МОм
ГОСТ Р EN ISO 20347-2013	Система стандартов безопасности труда. Средства индивидуальной защиты ног. Обувь специальная. Технические требования	01.12.2014	Электрическое сопротивление	100 кОм до 1000 МОм
ГОСТ Р 53734.3.1-2013	Электростатика. Методы моделирования электростатических явлений. Электростатический разряд. Модель человеческого тела.	01.03.2014	Электрическое сопротивление	1000 МОм

Табл. 1.4. Перечень основных нормативных документов, регламентирующих электростатические показатели, влияющие на здоровье человека [21-23, 30, 52]

Нормативный правовой акт	Наименование нормативного правового акта	Дата вступления в силу действующей редакции	Нормируемый показатель	Значение нормируемого показателя
ТР ТС 007/2011	О безопасности продукции, предназначенной для детей подростков.	23.09.2022	Напряженность электростатического поля	не более 15 кВ/м
ТР ТС 019/2011	О безопасности средств индивидуальной защиты	29.05.2019	Напряженность электростатического поля	не более 15 кВ/м
			Электрическое сопротивление между подпятником и ходовой стороной подошвы обуви	от 10^6 до 10^8 Ом
ТР ТС 017/2011	О безопасности продукции легкой промышленности	09.08.2016	Напряженность электростатического поля	не более 15 кВ/м
СанПиН 1.2.3685-21 Постановление 2 Об утверждении санитарных правил и норм	Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания»	30.12.2022	Напряженность электростатического поля	не более 15 кВ/м

Табл. 1.5. Перечень основных нормативных документов, регламентирующих электростатические показатели на производстве [16-17]

Нормативный правовой акт	Наименование нормативного правового акта	Дата вступления в силу действующей редакции	Нормируемый показатель	Значение нормируемого показателя
1	2	3	4	5
ГОСТ IEC TR 61340-5-2-2021	Электростатика. Защита электронных устройств от электростатических явлений. Руководство по применению	01.05.2021	Сопротивление для снижения напряжения МЧТ менее 100 В	не более $3.5 \cdot 10^7$ Ом

1	2	3	4	5
ГОСТ ИЕС 61340-5-1-2019	Электростатика. Защита электронных устройств от электростатических явлений. Общие требования	01.08.2019	Напряженность электростатического поля, в точке, где обрабатывается ЧЭСР-компонент	не более 10000 В/м
			Сопротивление от точки на поверхности до точки заземления	не менее $1,0 \cdot 10^9$ Ом
			Сопротивление между функциональным и защитным заземлением	не более 25 Ом
			Напряженность электростатического поля в месте, где используются ЧЭСР-компоненты	не более 5000 В/м

Табл. 1.6. Перечень основных нормативных документов, регламентирующих электростатические требования к материалам обуви и одежды [24, 26]

Нормативный правовой акт	Наименование нормативного правового акта	Дата вступления в силу действующей редакции	Нормируемый показатель	Значение нормируемого показателя
ГОСТ ИЕС 61340-2-3-2023	Электростатика. Методы определения сопротивления и удельного сопротивления твердых материалов, используемых для предотвращения накопления электростатического заряда	01.07.2023	Электрическое сопротивление	от 10^4 до 10^{12} Ом
ГОСТ 32995-2014	Материалы текстильные. Методика измерения напряженности электростатического поля	01.07.2017	Напряженность электростатического поля	не более 15 кВ/м

В РФ антистатическую обувь при сертификации или декларировании относят к средствам индивидуальной защиты от статического электричества и ссылаются

на ТР ТС 019/2011 «О безопасности средств индивидуальной защиты» [22]. Сертификат соответствия или декларация [163, 164] на обувь выдаются на основании следующих нормативных документов: ГОСТ 12.4.124-83 «Средства защиты от статического электричества. Общие технические требования», (п.2.11.1) [11]; ГОСТ Р ЕН ИСО 20345-2011 «Средства индивидуальной защиты ног. Обувь защитная. Технические требования», (п.6.2.2.2) [18]; ГОСТ ИЕС 61340-4-3-2020 «Электростатика. Методы испытаний для прикладных задач. Обувь» [13]; ГОСТ Р 12.4.187-2024 «Обувь специальная для защиты от общих производственных загрязнений. Технические условия» [42]; ГОСТ 28507-90 «Обувь специальная кожаная для защиты от механических воздействий. Общие технические условия» [162].

Таким образом, соблюдение требований государственных стандартов является важной составляющей в решении задач обеспечения безопасности и защиты от статического электричества, при этом в степени соответствия антистатической обуви функциональному назначению принадлежит ведущая роль в системе управления качеством для развития промышленности [165]. Поэтому представляется целесообразным рассмотреть критерии, предъявляемые к рабочей обуви в различных отраслях производства, так как в зависимости от специфики работы каждой отрасли, требования к ней могут существенно различаться. К примеру, в электроэнергетике, химической или электронной промышленности необходимо учитывать не только антистатические свойства, но и защиту от агрессивных сред.

1.3. Требования, предъявляемые к рабочей обуви по отраслям производства

На производстве работникам предприятий необходима защита от внешних негативных факторов. Для соблюдения норм безопасности на предприятиях необходимо применять не только специальную одежду с защитой от различных вредных и опасных факторов [27, 47, 72, 148, 255], но и существенную роль в обеспечении безопасности стоп работников играет специальная обувь, поэтому

особенно важно, чтобы она соответствовала условиям производства каждой отрасли. В зависимости от отрасли к каждой конструкции, предъявляются требования, которые можно разделить на требования для всех категорий специальной обуви, и дополнительные требования для отдельных категорий специальной обуви (рис. 1.2) [69].

По требованиям специальная обувь разделяется для отраслей промышленности [193-194, 234-239].

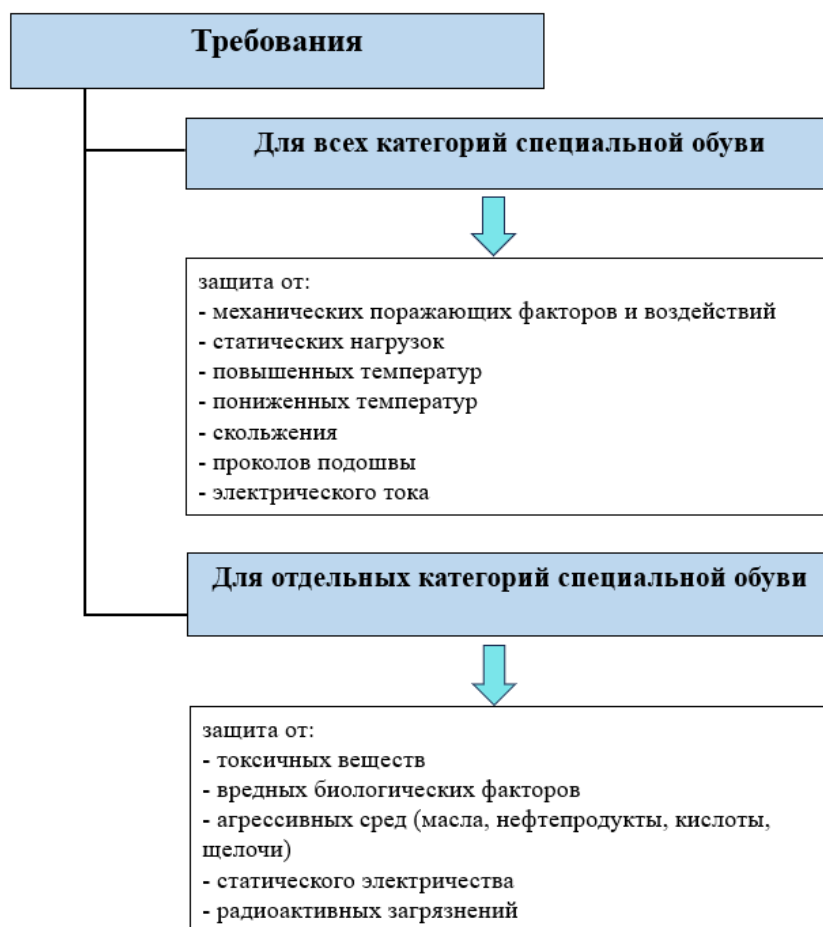


Рис. 1.2. Требования к специальной защитной обуви [69]

- **металлургической**:: использование натуральной кожи и огне- и термоустойчивых материалов; тепло-жаростойких (термостойких) нитей; для застёгивания должна быть шнуровка («змейка» замка подвергается перегреву и менее долговечна); стойкость к агрессивным средам (маслам, нефтепродуктам, кислотам, щелочам); металлический подносок выдерживающий предельную ударную нагрузку 200 Дж; фиксирующий ремень; повышенная устойчивость к

истиранию; защита от попадания внутрь влаги, пыли и мелких предметов; отличная теплоизоляция; сопротивление подошвы проколам; нитриловая подошва; слабая теплопроводность; литьевой метод крепления (подошва должна быть непроницаемой, нескользящей, амортизирующей, а внутри желательно повторять анатомическую форму стопы) [69].

- **нефтяной:** защита от механических поражающих факторов; полиуретановые сапоги (по сравнению с аналогами из ЭВА, ПВХ, ТЭП, резины они легче на 30% продукции из резины и ПВХ, что позволяет не так уставать ногам при долгом хождении); высокая прочность и износоустойчивость; нейтральность к развитию и распространению бактерий и микроорганизмов; высокая стойкость к агрессивным жидким средам и химически активным газам (щелочей, кислот, растворителей, нефтепродуктов, масел); антистатические свойства; защита от низких температур; защита от попадания внутрь влаги, снега, пыли и мелких предметов; сопротивление подошвы к проколам; рекомендация для климатических поясов; оснащение обуви регулируемым голенищем (для удобства носки); литьевой метод крепления [69].

- **горнодобывающей:** использование натуральной кожи и огне- и термоустойчивых материалов; антискользящая подошва со стальной носочно-пучковой частью и поддержкой для стопы; супинатор из эластичных волокнистых материалов; специальные стельки-прокладки, обеспечивающие защиту от влажности и достаточную изоляцию ног; легкий вес; литьевой метод крепления [69].

- **энергетической:** использование качественных и безвредных материалов; нормальный микроклимат обуви, позволяющий стопам «дышать»; комфортность и удобство носки; высокая прочность и износоустойчивость; литьевой метод крепления [69].

- **пищевой:** антискользящая подошва; антистатические свойства; стойкость к влиянию агрессивных сред (пищевых жиров, дезинфицирующих растворов); стойкость к гидролитическому старению; способность выдерживать нагрузки многократных изгибов в условиях воздействия агрессивных сред и

повышенной влажности; высокие гигиенические и антибактериальные свойства [69].

- **строительной:** высокая прочность и износоустойчивость; металлический подносок, выдерживающий предельную ударную нагрузку 200Дж; защита от попадания влаги, снега, грязи; легкость обуви; сопротивление подошвы к проколам; литевой метод крепления [69].

- **машиностроительной:** использование натуральной кожи и огне- и термоустойчивых материалов; высокая прочность и эластичность подошвы; подошва из износостойкого и маслобензостойкого полиуретана; защита от механических поражающих факторов; металлический подносок выдерживающий предельную ударную нагрузку 200 Дж; антипрокольная пластина; защитный подносок из металла; жесткий задник; нетканая подкладка; литевой метод крепления [69].

Независимо от того, в какой отрасли специальная обувь используется, необходимо, чтобы она защищала стопу человека от негативных факторов, но при этом была удобной в носке и имела эстетичный приятный вид. Если специальная обувь выбрана правильно, то нога не будет уставать и утомляемость работника в процессе трудовой деятельности снизится. Немаловажно, чтобы все типы обуви, предназначенные для различных отраслей промышленности, были гигиеничны и изготавливались из экологически чистых материалов. Кроме того, внешний вид специальной обуви за последние годы претерпел сильные изменения, т.к. является частью униформы.

Тип специальной обуви, выданной работникам, напрямую зависит от особенностей и требований конкретной отрасли производства. Каждая индустрия имеет свои уникальные условия работы, что влияет на выбор материалов, конструкции и функциональных характеристик обуви.

Работники строительных организаций чаще всего обеспечиваются кожаной и резиновой обувью. Оснащение промышленного альпиниста имеет специальную защиту от скольжения. Выдается обувь кожаная или из других

материалов для защиты от механических воздействий; обувь для защиты от производственных загрязнений; обувь с защитой от пониженных температур [234].

Ботинки рабочих металлообрабатывающих производств должны защищать от ожогов, случайных попаданий раскаленных частиц. Выдаваемая обувь: сапоги литейщика; сапоги, ботинки или полуботинки кожаные с защитным подноском; валенки с резиновым низом или кожаные сапоги, утепленные с защитным подноском [235].

В процессе работы **металлурги** постоянно подвергаются опасности. Зачастую от воздействия температуры, брызг раскаленного металла и других форм внешнего воздействия сильно страдают и ноги. Выдаются ботинки или сапоги кожаные с защитным подноском; обувь, прошитая термостойкими нитями [236].

Подошва обуви **горнорабочего** является ключевым элементом, она обязательно должна быть непроницаемой, нескользящей, амортизирующей, при этом желательно, чтобы опорная внутренняя стелечная поверхность повторяла анатомическую форму плантарной поверхности стопы. Выдаются сапоги или ботинки кожаные с жестким подноском; сапоги резиновые с жестким подноском; сапоги кожаные с утепленной прокладкой; галоши диэлектрические; валенки с резиновой подошвой [236].

Добыча и **переработка нефти и нефтепродуктов** – опасное производство, поэтому к рабочей обуви, используемой в этой отрасли, предъявляются особые требования. Как показывает практика, работники нефтяной отрасли чаще всего страдают от ожогов при возгорании нефти. Для изготовления такой обуви, как правило используют огнестойкие материалы. Выдаются сапоги резиновые с защитным подноском; сапоги резиновые или болотные с жестким подноском; сапоги или ботинки кожаные с жестким подноском; ботинки, утепленные с жестким подноском; валенки с резиновым низом [237].

На **химическом производстве** работник должен быть обеспечен обувью, стойкой к агрессивным средам. Применяются варианты с маслобензостойкой и непрокаляемой подошвой. Выдаются сапоги или ботинки кожаные с защитным подноском; сапоги или ботинки, утепленные с защитным подноском; валенки с

резиновым низом; галоши диэлектрические; сапоги или полусапоги резиновые с защитным подноском [238].

В электроэнергетической промышленности особое внимание нужно уделять защите стоп от искр, брызг и расплавов металла. Выдаются сапоги или ботинки кожаные с защитным подноском; сапоги резиновые с защитным подноском; валенки с резиновым низом; сапоги или ботинки кожаные, утепленные с защитным подноском; сапоги или ботинки термостойкие; ботинки кожаные от повышенных температур [239].

Все вышеперечисленные требованиями считаются эталонными для рабочей обуви, которая призвана защищать стопы работников от негативных воздействий производственной среды, и улучшать условия труда. Тип, количество и особенности эксплуатации спецобуви определяют нормы ее выдачи основании Приказов Минздравсоцразвития и Минтруда РФ (табл. 1.7) [69].

Табл. 1.7. Типовые нормы выдачи специальной обуви по климатическим поясам

Нормативные документы по типовым нормам выдачи	Сроки носки летней обуви (в годах)	Сроки носки утепленной обуви по климатическим поясам (в годах)				
		I	II	III	IV	особый
1	2	3	4	5	6	7
Приказ Минтруда РФ от 9.12.2014 г. N 997н «Об утверждении типовых норм бесплатной выдачи ... работникам сквозных профессий... »	1	2	1,5	1,5	1	1
Приказ Минздравсоцразвития РФ от 09.12.2009 г. N 970н «Об утверждении типовых норм бесплатной выдачи ... работникам нефтяной промышленности... »	1	2	1,5	1,5	1	1
Приказ Минздравсоцразвития РФ от 11.08.2011 г. N 906н «Об утверждении типовых норм бесплатной выдачи ... работникам химических производств... »	1	4	3	2,5	2	2
Приказ Минздравсоцразвития РФ от 25.04.2011 г. N 340н «Об утверждении типовых норм бесплатной выдачи ... работникам	1	2	1,5	1,5	1	1

1	2	3	4	5	6	7
организаций электроэнергетической промышленности...						
Приказ Минздравсоцразвития РФ от 16.07.2007 N 477 «Об утверждении типовых норм бесплатной выдачи... работникам, занятым на строительных, строительномонтажных и ремонтно-строительных работах... »	1	4	3	2,5	2	2
Приказ Минтруда России от 01.11.2013 N 652н «Об утверждении типовых норм бесплатной выдачи... работникам горной и металлургической промышленности... »	1	2	1,5	1,5	1	1
Приказ Минздравсоцразвития РФ от 14.12.2010 г. N 1104н «Об утверждении типовых норм бесплатной выдачи ... работникам машиностроительных и металлообрабатывающих производств... »	1	4	3	2,5	2	2
Приказ Минздравсоцразвития РФ от 22.06.2009 г. N 357н «Об утверждении типовых норм бесплатной выдачи ... работникам автомобильного транспорта... »	1	2,5	2	2	1,5	1,5

Действующие нормы выдачи специальной обуви не учитывают деградацию антистатических свойств в зависимости от времени и интенсивности носки, что существенно влияет на безопасность производственной деятельности персонала [74].

Изложенное выше составило основу классификации типовых конструкций специальной обуви, в соответствии с предъявляемыми к ней требованиями для каждой отрасли производства (рис. 1.3).

Анализ классификации показывает, что в нефтегазоперерабатывающей и химической отраслях обувь классифицируется по температурным, ударопрочным и др. характеристикам, хотя они относятся к наиболее «опасным» в отношении статического электричества. Тем не менее классификация систематизирует

информацию о специальной обуви и может быть использована при ее закупке работникам сквозных профессий.



Рис. 1.3. Классификация типовых конструкций специальной обуви по отраслям производств [69]

Кроме того, такая классификация облегчает конструктивно-функциональный анализ изделий, прежде всего по ассортименту используемых для изготовления деталей антистатической обуви материалов.

В рамках настоящей работы нами проведена экспертная оценка рынка с целью определения критериев выбора рабочей обуви в различных отраслях производства. В маркетинговом исследовании участвовало 10 специалистов-экспертов от предприятий «ЗиО-Подольск», «Выксунский металлургический завод», «ВолгаНефтеГаз», «Тюменнефтегаз», «Сибуголь» и «Угольная компания «Северный Кузбасс» [62, 69, 94].

Задача исследования потребителей рынка СИЗ состояла в получении подробной информации – где, кем и на основе каких стандартов принимается решение о закупке и совершении покупки; установить какими необходимыми свойствами для потребителя должна обладать рабочая обувь; понять нужно ли обновление норм выдачи СИЗ по отраслям производств; выяснить, какое отношение имеет потребитель к производителям на рынке; сформировать сложившийся облик фирм в сознании потребителя и раскрыть наиболее значимые факторы, которые оказывают влияние на подбор продукта [64, 69].

Сформированная нами из 16 вопросов анкета (Приложение А) не должна была утомить опрашиваемых экспертов и предполагала получение достаточной информации о критериях выбора специальной обуви. Ниже представим некоторые результаты опроса (рис. 1.4, 1.5).

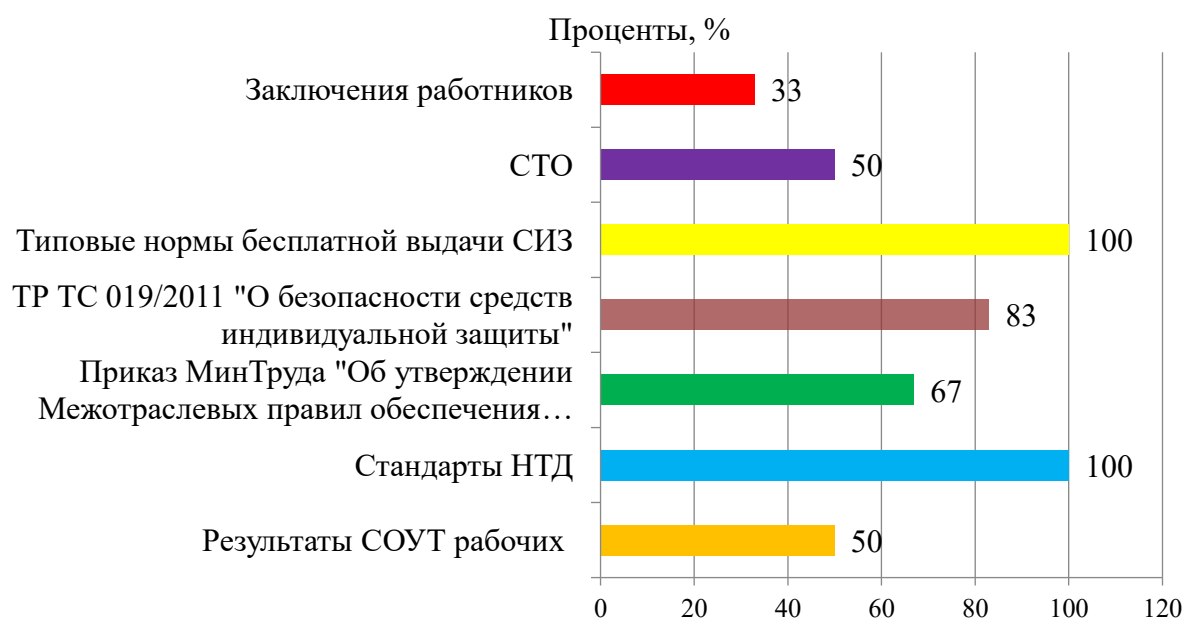


Рис. 1.4. Гистограмма распределения ответов на вопрос: «Чем руководствуется Ваше предприятие, когда составляет требования к закупаемой обуви?» [69]

Из ответов респондентов следует (рис. 1.4), что типовыми нормами бесплатной выдачи СИЗ, равно как и стандартными НТД руководствуются все предприятия. Несколько меньшее их число опирается на ТР ТС 019/2011 (83%) и Приказ МИНТРУДа (67%). 50% опрошенных отметили, что используются

стандарты предприятия и результаты СОУТ (специальная оценка условий труда). И только 33% из числа опрошенных заявили, что учитываются отзывы рабочих.

Из рис. 1.5 видно, что все респонденты выбрали защиту от повышенных температур, 67% - от масел и нефтепродуктов, 53% - от статического электричества, 50% - защиту от механических повреждений, 33 % - от низких температур и влаги и по 17 % - от проколов и открытого огня. При этом защиту от общих производственных загрязнений не выбрал ни один из респондентов [64, 69].



Рис. 1.5. Диаграмма распределения ответов на вопрос: «При покупке рабочей обуви, какими защитными свойствами она должна обладать?» [69]

Проведенное маркетинговое исследование позволило выявить, что большинство предприятий использует установленную действующим законодательством [25] тендерную форму отбора предложений на поставку рабочей обуви. Экспертная оценка показала, что тренд выбора предприятий определяет соотношение цены и качества поставляемых товаров и услуг, а также критерий «соответствие требованиям, предъявляемым к условиям вашего предприятия». Большая часть предприятий тратит на закупку одной пары рабочей обуви в среднем от 1000 – 3000 рублей и только одно предприятие выделяет более

3000 рублей. Периодичность закупки новой партии происходит в соответствии с типовыми нормами бесплатной выдачи средств индивидуальной защиты.

Больше половины предприятий закупают рабочую обувь у разных фирм-производителей, остальные выбирают продукцию известной и надежной ГК «Восток-Сервис». На всех без исключения предприятиях, от которых приняли участие в исследовании эксперты, используется антистатическая обувь, что говорит о высокой потребности в данной продукции. Это позволяет, во-первых, еще раз убедиться в актуальности диссертационного исследования, во-вторых, дифференцировать различные отрасли производств по потребностям типов рабочей обуви, в-третьих, обратиться к анализу рынка антистатической обуви.

1.4. Анализ современного рынка антистатической обуви

Одним из ключевых элементов антистатической обуви — это её подошва, которая должна быть изготовлена из материалов, способных эффективно проводить электрический заряд. Обычно для этих целей используется специальная антистатическая резина или полиуретан [192]. Верх антистатической обуви может быть выполнен из натуральной кожи или синтетических материалов, в которые внедрены токопроводящие волокна.

Мировой рынок антистатической обуви охватывает следующие регионы и страны [65, 92]:

- Северную Америку (США и Канада);
- Латинскую Америку (Мексика, Бразилия, Перу, Чили и др.);
- Западную Европу (Германия, Великобритания, Франция, Испания, Италия, страны Северной Европы, Бельгия, Нидерланды и Люксембург);
- Восточную Европу (Польша и Россия);
- Азиатско-Тихоокеанский регион (Китай, Индия, Япония, АСЕАН, Австралия и Новая Зеландия);
- Ближний Восток и Африку (ССЗ, Южная Африка и Северная Африка).

Ожидается, что мировой рынок антистатической обуви достигнет 965,8 млн. долларов США при среднегодовом темпе роста 1,8% в течение прогнозируемого периода до 2026 года (рис. 1.6) [251].



Рис. 1.6. Мировой рынок антистатической обуви по регионам, 2019 - 2026 гг. (млн. долларов США) [65, 251]

Производство антистатической обуви развито в США, Германии, Франции, Италии, Финляндии и др. Ключевыми игроками мирового рынка антистатической обуви являются следующие компании: Abeba (Германия), Aimont (Италия), Airtox Industries (Дания), Artra (Германия), Cofra (Италия), Dunlop (Нидерланды), Gaston Mille (Франция), Giasco (Италия), Honeywell (США), Jallatte (Франция), Keen Footwear (США), Lemaitre Securite (Франция), Perf (Италия), Red Wing (США), Schuh Weeger (Германия), Sievi (Финляндия), Toffeln (Англия).

В 2019 году доля Северной Америки на мировом рынке антистатической обуви составляла более 28%, и, по прогнозам, в период до 2026 года она значительно увеличится. Положительная динамика спроса на антистатическую обувь связана с ростом специализированных рынков и ужесточением законодательства в США. Ожидается, что в течение следующих нескольких лет рынок Азиатско-Тихоокеанского региона вырастет примерно на 7,5% за счет более строгого исполнения мер по охране труда и технике безопасности для сведения к

минимуму травмоопасных случаев на производстве [197, 283]. Предполагается, что рынок оживят китайская и индийская электронная промышленность [65].

На сегодняшний день доступность статистических данных по объемам рынка антистатической обуви в России, Азии и Европе довольно ограничена. Несмотря на рост интереса к вопросам безопасности труда и охраны здоровья на рабочих местах, специализированные исследования и отчеты, фокусирующиеся исключительно на антистатической обуви, не всегда могут быть найдены в открытых источниках. Подобный вакуум информации подчеркивает необходимость более тщательных исследований и аналитики в этой области.

Другие переменные, которые могут объяснить растущий спрос на антистатическую обувь, связаны с пересмотром правил ее использования, изменением нормативной базы, увеличением инвестиций производителей в НИОКР и др.

Анализ китайских научных исследований показал, что необходим междисциплинарный подход к разработке антистатической обуви, который включает в себя не только новейшие производственные технологии [414, 415], но и усиленное внимание к эргономическим характеристикам [414], а также к требованиям безопасности в специфических отраслях [416, 417, 418]. Особое внимание уделяется новым материалам [419, 420] и их совместимости для обеспечения долговременной стабильности свойств антистатической обуви, особенно в зимний период [414]. Подчеркивается важность регулярного тестирования [421] и совершенствования свойств обуви для предотвращения статических электрических разрядов, что особенно критично в опасных производственных условиях.

Сегментация рынка по материалам низа обуви: ПУ/ТПУ (полиуретан/термополиуретан), СПУ (силикатный полиуретан), ПВХ (поливинилхлорид), резина показывает, что на антистатическую обувь с ПУ/ТПУ подошвами по объему продаж приходится большая его часть, который в 2023 году составил 66,23%. Ожидается, что сегмент обуви на подошве из ПВХ в Азиатско-Тихоокеанском регионе вырастет со среднегодовым темпом в 3,5% благодаря

новым стандартам безопасности на рабочем месте, установленным регулируемыми органами. Кроме того, технические инновации и меняющиеся запросы клиентов обеспечат рост рынка защитной обуви [65].

В современных условиях практически вся рабочая одежда изготавливается из тканей, содержащих синтетические волокна, что обуславливает накопление заряда статического электричества на персонале, создавая дискомфорт для рабочего. Заряды статического электричества могут накапливаться на людях, особенно при использовании обуви с непроводящими электрический ток подошвами, одеждой и бельем из шерсти, шелка и искусственных волокон, а также при движении по непроводящему покрытию пола и выполнении ручных операций с веществами-диэлектриками (например, на отделочных работах, при резке пенополистирола и пр.).

Кроме того, повышается риск воспламенения из-за проскакивания искры по «вине» электростатического разряда.

Высококачественная антистатическая обувь изготавливается из натуральной кожи [79], на кожаной или полиуретановой подошве, и обязательно маркируется стандартным ESD-символом. Антистатическая обувь, представленная на мировом рынке в широком ассортименте, теоретически позволяет подобрать самые разнообразные модели.

Ассортимент антистатической обуви включает сандалии, сабо, туфли, полуботинки, ботинки, сапоги, а также одноразовые и многоразовые бахилы и приспособления на обувь (рис. 1.7 – 1.10) [92].



Рис. 1.7. Антистатические сандалии и сабо [392, 393]



Рис. 1.8. Антистатические туфли и полуботинки [394, 395]



Рис. 1.9. Антистатические ботинки и сапоги [396, 397]



Рис. 1.10. Антистатические бахилы, стельки, ремешки и носки [398, 399, 400, 401]

Рассмотрим ассортимент обуви некоторых компаний.

Компания Abeba один из крупнейших и самых современных производителей обуви в Европе [166]. Обувь изготавливается из кожи, имеет ортопедическую кожаную стельку и мягкую амортизирующую подошву, гарантирующую комфорт и здоровье ног. Обувь Abeba, как для профессионалов, так и для бытового применения разрабатывается специалистами-технологами. Сфера использования этой обуви почти безгранична. Компания ежегодно обновляет свои коллекции, следуя современным тенденциям и требованиям.

Антистатические стельки Abeba 2590.3577 (рис. 1.11) обеспечивают циркуляцию воздуха по всей ее поверхности и немедленное удаление пота [167]. Антистатические женские/мужские сабо Abeba 2590.4045 (рис. 1.11.) на резиновой подошве с высокой степенью противоскольжения имеют защитные свойства согласно стандартам EN ISO 20347:2012 [45] и ГОСТ IEC 61340-4-3-2020 [13], типовое электрическое сопротивление сотрудника в обуви составляет $10^5 - 10^7$ Ом [168].



Рис. 1.11. Антистатическая стелька Abeba 2590.3577 и обувь Abeba 2590.4045 [402, 403]

Компания Giasco одна из компаний-лидеров на европейском рынке средств защиты ног, которая уже более 40 лет производит качественную специальную обувь, используя новейшие технологии. Все производственные мощности компании размещены в Италии в городе Кьямпо. При изготовлении подошв для большинства своих моделей, компания Giasco использует двухслойный полиуретан. Ассортимент продукции Giasco [169]: кожаная защитная обувь - ботинки, полуботинки, сапоги; легкая защитная обувь – сандалии; резиновая обувь – сапоги (рис. 1.12).



Рис. 1.12. Ассортимент компании Giasco (из открытых источников Internet)

Компания Cofra, основанная в 1938 году как семейная фирма по производству обуви ручной работы, в 1997 г. стала первым итальянским производителем специальной обуви, получившим сертификат UNIEN ISO 9001.

Примером антистатической обуви компании могут служить сабо Richard Oro SRC и полуботинки Tullus, представленные на рис. 1.13.



Рис. 1.13. Обувь компании Cofra (из открытых источников Internet)

Заготовка верха сабо – кожа с перфорацией; подкладка – Cambrelle - 100% полиамид, «дышащий», поглощает влагу, стойкий к истиранию; вкладная стелька - мягкая, анатомическая, поглощает влагу, стойкая к истиранию; подошва - полиуретан, противоскользящая; стандарты - EN ISO 20347:2012 [45], ТР ТС 019/2011 [22].

Полуботинки Tullus имеют внутри вкладную стельку AIR из материала ЭВА анатомической формы, которая обеспечивает комфорт во время носки и защиту от нефтепродуктов, кислот и щелочей концентрации до 20%, механических воздействий, общих производственных загрязнений, по антистатическим свойствам отвечает требованиям стандарта EN ISO 20345:2007 [46] предназначена для эксплуатации в атомной промышленности и пищевом производстве. В полуботинках не применяется металлическая фурнитура, верх обуви - синтетическая кожа Logica - гибкая, прочная, дышащая; подкладка - полотно текстильное воздухопроницаемое антибактериальное sany-dry; подносок - композитный материал TOP return (Мун 200); подошва двухслойная - полиуретан; метод крепления - литьевой; цвет – белый и соответствует ТР ТС 019/2011 [22].

Компания Sievi является известным производителем европейской спецобуви [170]. Рабочая обувь производится уже более 50 лет, и за этот срок завоевала огромную популярность не только в Финляндии, но и за её пределами.

Рабочая обувь Sievi для обеспечения комфорта при ходьбе изготавливается из натуральной высококачественной кожи с использованием современных технологий (рис. 1.14).



Рис. 1.14. Сабо компании Sievi [171]

Все защитные характеристики обуви тщательным образом тестируются в собственной лаборатории Sievi и практически более, чем в 2 раза превышают необходимые нормы, отраженные в европейских сертификатах ISO. Обувь, имеет европейский знак качества, отвечает требованиям стандартов EN ISO 20345:2007 [46] или EN ISO 20347:2012 [45] (рис. 1.15).

Защитная обувь EN ISO 20345										
EN ISO 20345	Сопротивление скольжению	Подносок (200J/15000 N)	Маслостойкая подошва FO	Закрытый Задник	Антистатический A (100 кΩ-1000 МΩ)	Ударопрочность E (мин. 20 Дж)	Водоотталкивающая кожа	Рифленая Подошва	Сопротивление проникновению гвоздей P (1100 N)	Материал резина/полиуретан
SB	•	•								
S1	•	•	•	•	•	•				
S2	•	•	•	•	•	•	•			
S3	•	•	•	•	•	•	•	•	•	
S4	•	•	•	•	•	•	•	•		•
S5	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•

КОЛОДКА МОДЕЛЬ ПОДОШВА МАТЕРИАЛ БЕРХА
46-52602-123-OPM

Профессиональная обувь EN ISO 20347										
EN ISO 20347	Сопротивление скольжению	Закрытый Задник	Антистатический A (100 кΩ-1000 МΩ)	Ударопрочность E (мин. 20 Дж)	Водоотталкивающая кожа	Рифленая Подошва	Сопротивление проникновению гвоздей P (1100 N)	Материал резина/полиуретан	Особые свойства Маслостойкая подошва FO	
0B	•								•	
01	•	•	•	•					•	
02	•	•	•	•	•				•	
03	•	•	•	•	•	•	•		•	
04	•	•	•	•				•	•	
05	•	•	•	•		•	•	•	•	

Рис. 1.15. Фрагмент требований стандарта EN ISO 20345:2007 [46] и EN ISO 20347:2012 [45]

В РФ антистатическую обувь изготавливает «Лаборатория Технологической Одежды», которая входит в холдинг Lamsystems, основанный крупнейшим российским производителем специализированного оборудования по обеспечению

технологической и бактериологической чистоты воздушной среды - «Ламинарные системы» [77, 172]. Она специализируется на разработке и изготовлении высокотехнологичных СИЗ для производств и лабораторий, где необходимо обеспечить чистоту воздушной среды, защиту продуктов от электростатически разрядов или предотвратить микробное и вирусное заражение персонала.

Так антистатическая обувь Avogadro (рис. 1.16) обеспечивает защиту от электростатических разрядов при работе на производственных участках, защищенных от электростатических разрядов. Нескользящая полиуретановая подошва создает условия непрерывного заземления при передвижении персонала в зоне антистатической защиты. Характеризуется нормированной проводимостью для стекания заряда с ноги на токопроводящий пол, маркируется ESD-символом; типовое поверхностное сопротивление 10^5 - 10^7 Ом [173].



Рис. 1.16. Антистатические обувь Avogadro (из открытых источников Internet)

ООО «Центр Профессиональной Обуви», созданное в 2000 году, занимает на рынке спецобуви и СИЗ свою, во многом уникальную, нишу [77, 174]. Обувь «ЦПО» испытывается нефтяниками и газовиками в суровых условиях Крайнего Севера, подвергаясь многочасовому воздействию низких температур, механических нагрузок, агрессивных сред, вибрации и других неблагоприятных факторов.

Конструкция антистатической обуви (рис. 1.17) включает в себя специальную подошву с заданной величиной электрического сопротивления и токопроводящим контактным элементом, соединяющимся с верхней одеждой, что обеспечивает беспрепятственное стекание заряда статического электричества.

Антистатическая обувь успешно прошла многочисленные испытания на соответствие требованиям ГОСТ ИЕС 61340-4-3-2020 [13].



Рис. 1.17. Антистатическая обувь компании «Центр Профессиональной Обуви» (из открытых источников Internet)

АО «ПТК «Модерам» с 2021 года реализует НИОКР, цель которой – разработка технологии производства специальной обуви с постоянными антистатическими свойствами, не зависящими от влажности и температуры окружающего воздуха [423]. Материалы низа антистатической обуви выполнены с использованием одностенных графеновых нанотрубок российского производства (рис. 1.18). АО «ПТК «Модерам» разработана коллекция антистатической обуви, проведена ее сертификация для внедрения на предприятиях атомной промышленности, организовано массовое производство.



Рис. 1.18. Антистатическая обувь компании «Модерам» (из открытых источников Internet)

Таким образом, можно сказать, что антистатическая обувь, как отдельная специфическая конструкция возникла сравнительно недавно. Специальная обувь различного назначения эксплуатируется в большинстве случаев в экстремальных условиях: одновременное активное функциональное нагружение стопы и интенсивное воздействие различных факторов окружающей среды. Поэтому, главным требованием, предъявляемым к обуви, как средству индивидуальной защиты, является обеспечение комфортного внутриобувного микроклимата. Последнее в значительной степени определяется конструкцией, материалами, из которых изготовлены детали обуви, способами скрепления заготовки верха с узлом низа.

Для изготовления заготовки верха антистатической обуви используются различные гарантирующие защиту материалы, к основным из которых можно отнести натуральную кожу, обеспечивающую прочность и комфорт при носке. Для материалов подкладки часто используется микрофибра с антистатическими свойствами и хорошей воздухопроницаемостью, а также специальные ткани с углеродной нитью. Анализ технологий ведущих производителей показывает, что при разработке конструкций антистатической обуви следует ориентироваться на литьевой метод крепления низа, который предполагает чаще двуслойную подошву - ПУ/ПУ, ПУ/ТПУ, ПУ/нитрил.

При создании ПУ с антистатическими свойствами характеристики компонентов композиции играют ключевую роль. Использование солей аммония в антистатических подошвах является одним из методов придания материалам антистатических свойств, именно этот метод чаще всего используют зарубежные производители антистатической обуви. Такие добавки выпускает концерн BASF и другие крупные производители химических компонентов.

Соли аммония, такие как хлорид аммония (NH_4Cl) или сульфат аммония ($(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$), могут добавляться в состав материалов подошвы для улучшения их способности рассеивать статическое электричество, это достигается за счет повышения ионной проводимости материала и позволяет добиться определённых токопроводящих свойств готовой подошвы в пределах заданных стандартами

значений электрического сопротивления от 10^6 до 10^8 Ом. К преимуществам этого метода стоит отнести то, что эти соединения относительно дешевы, легко доступны и могут быть легко интегрированы в процесс производства подошв. Однако антистатические характеристики обуви на основе солей аммония имеют нестабильный характер. Со временем они вымываются из материала подошвы, что приводит к снижению токопроводящих свойств, а в условиях низкой влажности воздуха (менее 30-40%) эффективность этих свойств может полностью исчезнуть. Некоторые производители пытаются повысить концентрацию добавок для улучшения антистатических свойств, однако это негативно сказывается на стойкости материала к агрессивным веществам и его физико-механических характеристиках.

В современных антистатических материалах часто используются другие методы, такие как добавление углеродных наполнителей (например, карбоновые добавки, графен) или проводящих полимеров, которые обеспечивают более стабильные и долговечные антистатические свойства. Графеновые нанотрубки – это микроскопические конструкции в виде полых углеродистых трубок, толщина стенки которых составляет всего 1 молекулу углерода [348, 422]. В структуре подошвы графеновые трубки равномерно распределяются внутри материала, создавая своеобразную решетку или сетку, обеспечивающую токопроводящие свойства. Компания OCSiAl, крупнейший в мире производитель одностенных углеродных нанотрубок и промышленных модификаторов на их основе, выпускает нанотрубки под брендом TUBALL™.

В табл. 1.8 представлены свойства антистатических ПУ с различными добавками [424].

На основании сравнительного анализа трех типов добавок для антистатических материалов можно выделить несколько ключевых аспектов, которые помогут в выборе подходящего компонента для конечного материала.

Соли аммония представляют собой экономичный вариант, требующий концентрации от 0,2% до 4,0%, однако, их эффективность подвержена влиянию

внешних факторов, таких как температура и влажность, что негативно сказывается на долговечности антистатических свойств.

Табл. 1.8. Сравнительные характеристики компонентов для придания ПУ антистатических свойств

Параметр	Соли аммония	Карбоновые добавки	Нанотрубки TUBALL™
Рабочая концентрация, %	0,2 - 4,0	4,0 – 12,0	0,01 - 0,05
Диапазон электрического сопротивления, Ом	10^6 до 10^{11}	10^4 до 10^{11}	10^4 до 10^{11}
Влияние на механические характеристики ПУ	слабо негативное	негативное	нет
Влияние на деформацию и текучесть ПУ	нет	негативное	незначительное
Образование пыли при производстве	нет	высокое	нет
Независимость электрического сопротивления от влажности	зависит	не зависит	не зависит
Независимость сопротивления от рабочей температуры	зависит	не зависит	не зависит
Независимость сопротивления от вымывания	зависит	не зависит	не зависит
Пробивание материала электрическим током	нет	высокий риск	нет
Стабильное сохранение сопротивления с течением времени	нет	да	да

Карбоновые добавки требуют более высокой концентрации (от 4% до 12%) для достижения желаемых антистатических свойств, в результате чего увеличивается стоимость конечного продукта. Добавки оказывают негативное влияние на механику материала и сопряжены с высоким риском пробивания электрическим током, что может быть опасно в некоторых видах производственной деятельности. Однако, они обеспечивают стабильность электрического сопротивления, вне зависимости от внешней среды.

Нанотрубки TUBALL™ выступают наилучшим вариантом, требуя минимальной концентрации (от 0,01% до 0,05%) и не оказывая негативного

влияния на механические свойства ПУ. Они не образуют пыли при производстве и обеспечивают стабильные характеристики, не подверженные внешним влияниям. Тем не менее, следует учитывать, что использование нанотрубок может оказаться более дорогим.

Таким образом, на основе анализа конструкций и технологий проектирования специальной и антистатической обуви выявлена наметившаяся тенденция к расширению объема и ассортимента специальной обуви. Вместе с тем, рынок РФ еще слабо развит в отношении антистатической обуви. Для понимания механизма формирования и возможности регулирования защитных функций специальной обуви обратимся к «устройству» ее отдельных конструкций.

1.5. Классификация деталей специальной обуви по защитным свойствам

По результатам анализа нормативно-технической документации и рынка можно заключить, что основными видами специальной и индивидуальной защитной обуви являются сапоги, ботинки и полуботинки. Вариации в исполнении конструкций обусловлены, с одной стороны, возможностями обувного производства, с другой – особенностями предприятий-потребителей обуви. При этом наибольшую значимость для исключения или минимизации воздействий зарядов статического электричества имеет наличие в конструкции тех или иных деталей, которые изготавливаются из различных материалов. Можно предположить, что замена деталей из материалов одних свойств на детали из материалов других свойств, позволит регулировать защитные качества обуви.

Отметим, что в ГОСТ 12.4.103-2020 «Одежда специальная защитная, средства индивидуальной защиты ног и рук» [39] не сказано, какие детали обуви обеспечивают нужный уровень защиты конструкции в целом. Поэтому представим защитные свойства изделий, как набор защитных свойств деталей специальной обуви и проклассифицируем их в зависимости от обеспечиваемого ими уровня защиты стопы.

В связи с этим обратимся к ГОСТ 23251-2023 «Обувь. Термины и определения» [351]; ГОСТ Р 12.4.187-2024 «Обувь специальная для защиты от общих производственных загрязнений. Технические условия» [42]; ГОСТ Р ЕН ИСО 20345-2011 «Средства индивидуальной защиты ног. Обувь защитная. Технические требования» [18], ГОСТ 12.4.103-2020 «Одежда специальная защитная, средства индивидуальной защиты ног и рук» [39]. Резюмируя эти документы, нами предлагается перечень наружных, внутренних и промежуточных деталей верха и низа специальной обуви.

В целом, от механических воздействий стопу защищают такие детали, как беред, союзка, задинка, носок, жесткий подносок, жесткий задник, стелька, подошва. От радиоактивных загрязнений защищают беред, союзка, задинка, носок, подошва. От повышенных температур – подошва, союзка, берцы, голенище. От электрического тока – наружные детали верха (носок, союзка, берцы, голенище, задинка) и низа (подошва) обуви. От нетоксичной пыли, токсичных веществ, воды, растворов кислот, щелочи, органических растворителей, нефти, общих производственных загрязнений, статических нагрузок защищают наружные детали верха (носок, союзка, берцы голенище, задинка) и низа (подошва) обуви. Уровень защиты от пониженных температур, при прочих равных условиях, зависит от материала подкладки. От вредных биологических факторов стопу защищает стелька, подошва и все наружные детали верха обуви [79]. В качестве примера приведем детали модели обуви, отвечающей требованиям Технического регламента [22], ГОСТ 34734-2021 [38]. Класс защиты – F2A (рис. 1.19).

Рассмотрев детали специальной обуви с позиций выполняемых ими функций в конструкции изделия, нами предложена обобщенная схема конструкций специальной обуви (рис. 1.20), в которой наружные, промежуточные, внутренние детали верха и низа обуви соотнесены с видами воздействий окружающей и производственной среды и выполняемыми ими защитными функциями.



Рис. 1.19. Внутреннее устройство модели обуви:

- 1 - накладка для лучшей защиты голени от травмирующих факторов, 2 - изолятор мембраны, 3 - полиуретановая защитная накладка, 4 - подошва антистатическая с противоскользящим протектором, 5 - подносик стальной, 6 - мембрана, 7 - стелька вкладная, 8 - втачная стелька, 9 - стальная стелька для защиты от проколов, 10 - боковая защита голеностопного сустава, 11 - анатомически сегментированный задник для лучшего сгибания, 12 - светоотражающие ленты, 13 - вентиляционные канавки, 14 - мягкий кант усиленный

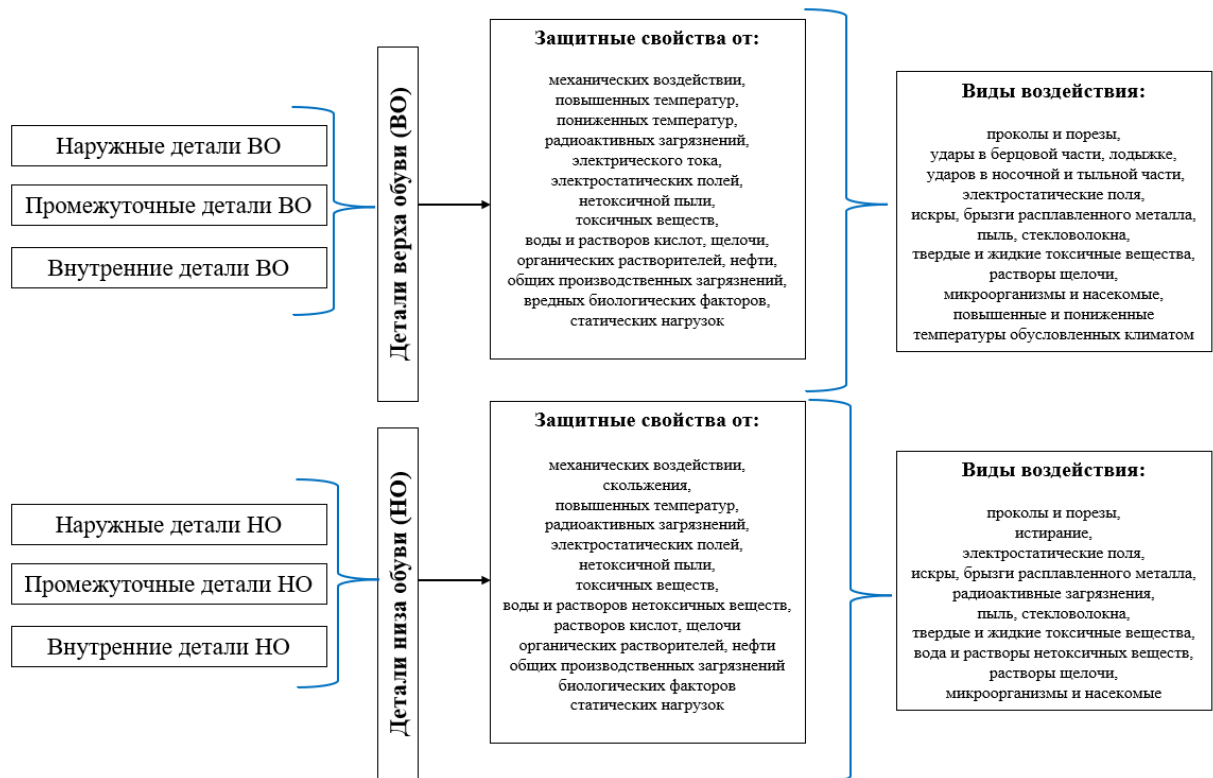


Рис. 1.20. Обобщенная схема деталей специальной обуви, обеспечивающей различные защитные свойства

Схема допускает аргументированный выбор материалов той или иной детали обуви, что положительно отразится на защитных свойствах конструкции в целом

[79] и может служить основой для разработки базы данных как материалов, так и конструкций изделий. Это отвечает современным задачам цифровизации производства [125].

Сырьевая база материалов для деталей верха [150, 151, 176, 282, 380, 384, 385] и низа обуви обширна – это натуральные и искусственные кожи, тканые и нетканые полотна, изготовленные из льна, шерсти, сукна, шелка, различные полимерные композиты т.д. Вопросы, связанные с изучением гигиенических показателей (влагопроводность, влагопоглощение, гигроскопичность, капиллярность, влагоотдача и др.) перечисленных материалов, в литературе представлены широко, но практически отсутствуют данные по трибоэлектрическим свойствам. Поэтому необходимость исследования трибоэлектрических свойств материалов для деталей обуви очевидна [114].

ВЫВОДЫ ПО ПЕРВОЙ ГЛАВЕ

1. Показано, что антистатической специальной обуви отведена ключевая роль в системе защиты работников, особенно в условиях, где электростатические разряды могут представлять серьезную опасность. Поэтому стратегический подход к выбору и производству такой обуви, основанный на современных стандартах и научных исследованиях, является залогом безопасности на производстве и защиты здоровья работников.

2. На основе анализа действующих стандартов и регламентов, определяющих уровень антистатических характеристик, предложена классификация диапазонов электрического сопротивления обуви. Выявлено, что нормативные значения уровня антистатических показателей устанавливаются с использованием различных методов и типов испытательного оборудования. Несходные единицы измерений, т.к. отдельные стандарты регламентируют параметры напряженности электростатического поля, другие – электрического сопротивления, существенно усложняют оценку и сравнение безопасности изделий по антистатическим характеристикам, что свидетельствует об отсутствии единой

системы. Отмечены системные противоречия, в ГОСТ Р ЕН ИСО 20347-2013 «Средства индивидуальной защиты ног. Обувь специальная. Технические требования» [19] и ГОСТ Р ЕН ИСО 20345-2011 «Средства индивидуальной защиты ног. Обувь защитная. Технические требования» [18] у антистатической обуви электрическое сопротивление должно находиться в диапазоне от 10^5 - 10^9 Ом. В ГОСТ 12.4.124-83 «Средства защиты от статического электричества. Общие технические требования» [11] и ТР ТС 019/2011 «О безопасности средств индивидуальной защиты» [22] регламентирует более узкий интервал - от 10^6 до 10^8 Ом. А МЭК 61340-4-3:2017 «Электростатика. Часть 4-3. Стандартные методы испытаний для особых применений. Обувь» [63], по которому сертифицируется европейская обувь, предписывает интервал от 10^5 до 10^7 Ом.

3. Выявлено, что действующие нормы выдачи специальной обуви не учитывают деградацию антистатических свойств в зависимости от времени и интенсивности носки, существенно снижающие безопасность производственной деятельности персонала. Предложена классификация типовых конструкций специальной обуви по отраслям производств на основе анализа требований и типовых норм ее выдачи, которая рационализирует информацию об изделиях и может быть использована при их закупке работникам сквозных профессий.

4. Установлены критерии выбора рабочей обуви в металлургической, машиностроительной, горнодобывающей, энергетической и нефтегазохимической отраслях производств, которые могут быть использованы для актуализации отдельных положений действующей нормативно-технической документации в части типовых норм выдачи бесплатных средств индивидуальной защиты.

5. Разработана обобщенная структура деталей специальной обуви, обеспечивающих различные защитные свойства, которая может служить основой для разработки базы данных как материалов, так и конструкций изделий, что отвечает современным задачам цифровизации производства.

Отсутствие единой систематизированной базы знаний не позволяет на этапе конструирования спрогнозировать параметры антистатической обуви и гарантировать ее работоспособность в конкретных условиях. Поэтому особую

актуальность приобретают экспериментальные методы оценки параметров в реальных условиях эксплуатации.

Таким образом, для совершенствования технологий производства и создания безопасной и надежной специальной обуви для разных условий работы необходимы комплексные исследования электростатических свойств как ее отдельных материалов, так и конструкций в целом.

Последующие изыскания должны быть направлены на создание научно-практических основ разработки специальной антистатической обуви и методов оценки ее электростатических свойств, которые включают комплексные исследования и реализацию:

- методов измерений электростатических показателей обувных материалов для различных условий эксплуатации;
- базы знаний о свойствах материалов для создания конструкций обуви различного уровня антистатической безопасности;
- методов верификации антистатических свойств системы «обувь – человек – окружающая среда» в реальных условиях эксплуатации;
- моделирования накопления и стекания электростатических зарядов системы «обувь – человек – окружающая среда», что позволит создать рациональные условия, минимизирующие накопление статического заряда;
- феноменологических моделей, которые отражают корреляцию между ЭСП и потенциалом тела человека в системе «обувь – человек – напольное покрытие»;
- моделей электрического пробоя в материалах;
- концепции научно-обоснованной антистатической конструкции специальной обуви с заземляющими свойствами для производственных рабочих и инженерно-технических работников;
- рекомендаций для формирования актуальной нормативной базы производства и эксплуатации антистатической обуви.

ГЛАВА 2. РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ И ИССЛЕДОВАНИЯ ФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ОБУВНЫХ МАТЕРИАЛОВ

2.1. Электростатические явления в технологических процессах и их воздействие на человека

Статическое электричество и электростатический разряд на протяжении веков создавали серьезные производственные трудности. Еще в XV веке военные форты Европы и Карибского бассейна оснащались устройствами, с помощью которых пытались предотвратить непреднамеренное воспламенение пороховых складов. Во второй половине XIX века бумажные фабрики США использовали методы базового заземления и паровые барабаны для рассеивания статического электричества с бумажного полотна в процессе его сушки. Боеприпасы и взрывчатые вещества, нефтехимия, фармацевтика, сельское хозяйство, полиграфия, текстиль, покраска и производство пластмасс – вот лишь некоторые из отраслей, где контроль статического электричества имеет большое значение [55, 65, 429].

Отдельные производственные процессы сопровождаются статической электризацией, т.е. возникновением и разделением положительных и отрицательных зарядов [430]. Иногда они быстро стекают в землю, рассеиваются или нейтрализуются. В других случаях они накапливаются и создают поле с высокой электрической напряженностью, обуславливающее электрические разряды (пробой воздуха или среды). В производствах, связанных с применением легковоспламеняющихся и горючих жидкостей, газов, искровые разряды статического электричества могут вызвать взрыв и пожар [430]. В ряде производств статическое электричество порождает брак продукции, препятствует увеличению скорости работы машин и аппаратов и, следовательно, эффективности технологических процессов. При определенных условиях разряды статического

электричества причиняют травмы обслуживающему персоналу [4-9, 54, 65, 149, 430].

Эпоха электроники принесла с собой новые проблемы, связанные со статическим электричеством и электростатическим разрядом [89, 90, 93]. По мере развития и совершенствования электронных устройств, их чувствительность к электростатическим разрядам в целом нарастала. Эта тенденция ускоряется.

Отраслевой совет по целевым уровням ESD и «Дорожная карта технологии электростатических разрядов (ESD)» Ассоциации ESD [55], пересмотренная в апреле 2010 года, предполагают, что у проектировщиков снижаются возможности обеспечения доступных в прошлом уровней защиты ... «поскольку устройства становятся все более чувствительными, поэтому ... крайне важно, чтобы компании тщательно изучали возможности ESD в своих процессах обработки» [429].

Несмотря на большие усилия, предпринятые в течение последних десятилетий, опасность электростатического разряда по-прежнему влияет на производительность, стоимость производства, качество продукции, ее надежность и рентабельность. Стоимость поврежденных устройств колеблется от нескольких центов за простой диод до тысяч долларов за сложные интегральные схемы [429]. Сегодня многочисленные компании, занимающиеся производством электроники, широко внедряют в технологические процессы элементы статического контроля. Доступные международные отраслевые стандарты на портале EOS/ESD Association, Inc. (Setting the Global Standards for Static Control) [55] таких как, например, ANSI/ESD S20.20-2014 «Protection of Electrical and Electronic Parts, Assemblies and Equipment (Excluding Electrically Initiated Explosive Devices)» [91] позволяют мировым производителям установить основные методы снижения и контроля статических зарядов. Маловероятно, что какая-либо компания, которая игнорирует подобный контроль, сможет успешно производить и поставлять неповрежденные электронные компоненты.

Электростатический заряд определяется как «электрический заряд в состоянии покоя». Статическое электричество – это дисбаланс электрических зарядов внутри или на поверхности материала, который создает измеряемое

электрическое поле, влияющее на другие объекты. Электростатический разряд (ЭСР) определяется как «быстрая самопроизвольная передача электростатического заряда, вызванная сильным электростатическим полем» [429]. Обычно заряд протекает через искру между двумя заряженными и приближенными друг к другу телами с разным электростатическим потенциалом [65].

ЭСР может изменить электрические характеристики полупроводникового устройства, ухудшив или разрушив его, а также нарушить штатную работу электронной системы, что приведет к ее сбою или отказу оборудования. Заряженные поверхности могут притягивать и удерживать загрязняющие вещества, что затрудняет технологические процессы.

Управление ЭСР предполагает понимание того, как он образуется. ЭСР чаще всего возникает при контакте и разделении двух похожих или разных по составу материалов. При этом разные материалы имеют тенденцию высвобождать более высокие уровни статического заряда [429]. Например, человек, идущий по полу, генерирует статическое электричество, поскольку подошвы обуви соприкасаются, а затем отделяются от поверхности пола. Величина ЭСР в этом примере может быть разной, но статическое электричество образуется в любом случае.

Образование ЭСР при контакте/разделении материалов известно как трибоэлектрический заряд и связано с переносом электронов между материалами. Атомы материала без статического заряда имеют равное количество положительных (+) протонов в ядре и отрицательных (-) электронов, вращающихся вокруг ядра. На рис. 2.1 материал «А» состоит из атомов с равным количеством протонов и электронов. Материал В также состоит из атомов с одинаковым (хотя, возможно, и разным) числом протонов и электронов. Оба материала электрически нейтральны [65]. Когда два материала соприкасаются, а затем разделяются, отрицательно заряженные электроны переносятся с поверхности одного на поверхность другого. Какой из них теряет электроны, а какой приобретает, будет зависеть от их природы. Материал, который теряет электроны, становится положительно заряженным, а который приобретает электроны, заряжается отрицательно.

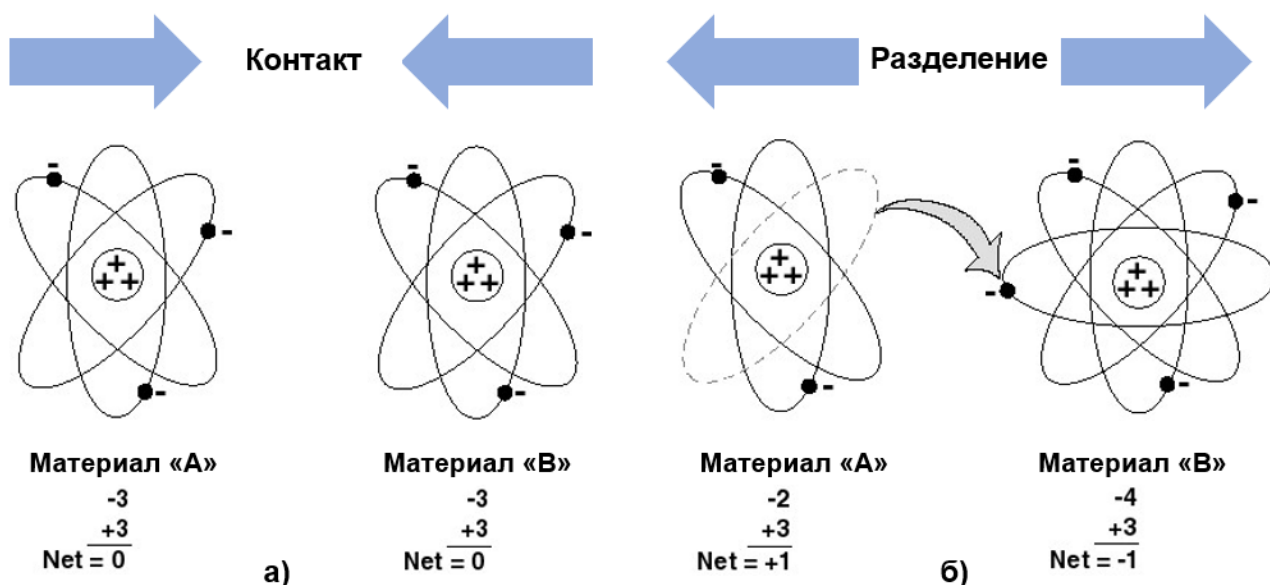


Рис. 2.1. Трибоэлектрический заряд:

а – создание электростатического заряда при контакте, б – разделение зарядов [65, 67]

Электрический заряд проводника определяется произведением емкости на электрический потенциал на объекте [67, 404]:

$$Q = C * \varphi, \quad (2.1)$$

где: Q – заряд, Кл;

C – емкость, Ф;

φ – электрический потенциал, В.

Потенциал отсчитывается от нулевого уровня на бесконечности. Принято, что потенциал земли $\varphi = 0$. Основная количественная характеристика ЭСП – напряженность ЭСП E , которая в данной точке пространства определяется как:

$$E = F / Q, \quad (2.2)$$

где F – сила, действующая на неподвижный точечный положительный электрический заряд.

Принято изображать ЭСП в виде силовых линий, плотность которых пропорциональна величине ЭСП. Силовые линии не замкнуты, начинаются на положительных зарядах и заканчиваются отрицательными зарядами [404].

В действительности же процессы контакта материала, переноса и разделения зарядов представляют собой гораздо более сложный механизм [65]. На величину заряда, создаваемого трибоэлектрической генерацией, влияют:

- площадь контакта;
- скорость разделения зарядов;
- относительная влажность воздуха;
- химический состав материалов и другие факторы.

В настоящее время нет еще единой теории, объясняющей это явление [59, 65]. Существует лишь ряд гипотез, но общим является возникновение двойного электрического слоя, который и служит непосредственным источником статических зарядов. Наиболее распространена гипотеза о контактной электризации веществ и материалов, согласно которой, электризация возникает при соприкосновении двух разнородных веществ с различными атомными и молекулярными силами притяжения на поверхности контакта [430]. При этом происходит перераспределение электронов или ионов вещества, образующее двойной электрический слой с зарядами противоположных знаков [430].

Экспериментами установлено также, что из двух трущихся веществ положительно заряжается то, у которого диэлектрическая проницаемость больше [59]. Если вещества имеют одинаковую диэлектрическую проницаемость, то заряды не возникают [430].

Образование двойных электрических слоев возможно при контакте тел и из одинаковых диэлектрических материалов за счет поверхностных загрязнений, различной температуры. Находящиеся в контакте тела с образовавшимся на границе раздела двойным электрическим слоем остаются электрически нейтральными, т.е. суммарный заряд системы может быть равен нулю, если до соприкосновения тела не несли избыточного заряда. Каждое из контактирующих тел приобретает электрический заряд, плотность которого равна плотности заряда, возникшего двойного электрического слоя. Знаки зарядов взаимодействующих тел противоположны [430].

Электризацию соприкасающихся тел изучал Коэн, который получил следующую формулу для оценки величины избыточного заряда Q [114, 149].

$$Q = k S_T (\varepsilon_1 - \varepsilon_2), \quad (2.3)$$

где k – электрический коэффициент;

S_T – площадь контакта соприкасающихся тел, m^2 ;

ε_1 и ε_2 – относительные диэлектрические проницаемости соприкасающихся тел.

Из соотношения следует [114]:

- из двух взаимно электризующихся диэлектриков положительно заряжается тот, который обладает большей диэлектрической проницаемостью;
- количество электричества, образующееся при трении двух тел, прямо пропорционально разности их диэлектрических постоянных.

Однако, в этих утверждениях столько же исключений, сколько и подтверждений [7]. Для объяснения наблюдаемых явлений использовалась модель, в которой предполагается образование на поверхности материалов двойного электрического слоя [149].

Потенциал двойного слоя рассчитывается по формуле:

$$\varphi = 4\pi\sigma d / \varepsilon_0, \quad (2.4)$$

где d – толщина электрического слоя, m ;

σ – поверхностная плотность электрических зарядов, $Кл/м^2$;

ε_0 – электрическая постоянная, $Ф/м$.

Поверхностная плотность электрических зарядов на материале рассчитывается по формуле

$$\sigma = Q / S, \quad (2.5)$$

где S – площадь поверхности материала, m^2 .

Наэлектризованность характеризуется удельной поверхностной (у твердых диэлектриков) или объемной (у сыпучих и жидких диэлектриков) плотностью заряда, а в некоторых случаях – удельным зарядом, приходящимся на единицу длины тела. Наэлектризованные тела или их участки, несущие заряды статического

электричества, оказывают силовое воздействие друг на друга. В окружающем их пространстве образуется электрическое поле, действие которого проявляется и обнаруживается при внесении в него заряженных и нейтральных предметов [430].

При разделении поверхностей с возникшей контактной электризацией каждая из них сохраняет свой заряд, а контактная разность потенциалов по мере уменьшения емкости поверхностей может достигнуть десятков и сотен киловольт [430]. Этим и объясняются высокие потенциалы, встречающиеся в различных производствах, особенно в тех, где используется чувствительная электроника или существует риск воспламенения от возникающих разрядов.

Для оценки *толщины электрического слоя* применяется формула:

$$d = \sqrt{D_{II}} \tau, \quad (2.6)$$

где D_{II} – коэффициент диффузии ионов, м²/с;

τ – постоянная времени релаксации заряда, с.

Электрический заряд, возникающий при контакте или трении на полимерном материале, не сохраняет своего значения во времени, так как может нейтрализоваться ионами из окружающего пространства или же стекать на заземленные тела благодаря электропроводности полимерной системы. В последнем случае условия разряда соответствуют условиям разряда конденсатора емкостью C через параллельно включенное омическое сопротивление R [114]. Для заряда, оставшегося на материале, действительно следующее уравнение:

$$Q_t = Q_0 \exp(t / RC), \quad (2.7)$$

где Q_t – заряд, оставшийся на материале, Кл;

Q_0 – начальный заряд, Кл;

t – время, с;

R – электрическое сопротивление, Ом;

C – емкость конденсатора, Ф.

При исследовании большого числа тканей из натуральных и синтетических волокон найдено, что $t_{\text{стац}} = RC$ почти пропорциональна $\lg R$, а наклон прямой был 0,86 вместо теоретического 1 [7].

В работах [6-7] стекание заряда с поверхности образца в случае, когда преобладает объемная проводимость, описывается уравнением:

$$Q = Q_0 \exp(-t/\tau), \quad (2.8)$$

где $\tau = \rho_v \epsilon \epsilon_0$, ϵ – относительная диэлектрическая проницаемость среды.

Уравнение корректно при условии, когда поле от заряда, релаксация которого имеет место, проходит исключительно сквозь среду с удельным объемным сопротивлением ρ_v и абсолютной диэлектрической проницаемостью $\epsilon \epsilon_0$. Ситуация со стеканием заряда существенно усложняется, если поле заряда распространяется по нескольким диэлектрикам с различными проводимостями и диэлектрическими проницаемостями. В этом случае необходимо использовать расчетные, а также наиболее достоверные экспериментальные методы [5, 114].

К основным физическим параметрам, которые характеризуют трибоэлектрические свойства обувных материалов и которые обычно регистрируют, относятся:

- удельное поверхностное и объемное электрическое сопротивление материала (ρ_s , Ом; ρ_v , Ом×м);
- значение поверхностного заряда (σ , Кл/м²), напряженности электростатического поля (потенциала) над поверхностью материала при электризации трением о другой материал (E , кВ/м);
- время стекания (релаксации) зарядов с поверхности материала (τ , с);
- полярность заряда (положительный или отрицательный);

На показатели перечисленных характеристик серьезное влияние оказывают климатические параметры окружающей среды и прежде всего температура и влажность воздуха, которые в процессе испытаний материалов необходимо строго контролировать.

Токи при статической электризации составляют обычно несколько микроампер и даже меньше. Так, при протекании к цистернам бензина по

трубопроводу был зафиксирован ток от 1 до 10 мкА, который оказался прямо пропорциональным скорости течения. Статическое электричество может накапливаться и на людях (обувь с не проводящими электричество подошвами, одежда и белье из шерсти, шелка и искусственного волокна) при движении по изолирующему полу и выполнении ручных операций с диэлектриками. Потенциал изолированного от земли тела человека может превышать 7 кВ, иногда (в зависимости от вида полимера и интенсивности трения частей одежды) он может достигать 14-45 кВ [59, 65, 430].

Гипотеза о контактной разности потенциалов не может дать количественной, а иногда и качественной оценки процесса электризации. Однако наряду с этим образование двойного электрического слоя объясняется поверхностной ориентацией нейтральных молекул, содержащих электрические диполи, пьезоэлектрическими явлениями, трением или генерацией электролита на контактирующих поверхностях [430].

ЭСР может быть создан на материале такими способами как индукция, ионизация или контакта с другим заряженным объектом. Однако трибоэлектрический эффект является наиболее распространенным типом контактной электризации, в которой некоторые материалы становятся электрически заряженными после того, как они входят в фрикционный контакт с другим материалом. Вещества можно расположить в трибоэлектрические ряды, в которых предыдущее тело электризуется положительно, а последующее – отрицательно. Типичный трибоэлектрический ряд показан на рис. 2.2.

Практически все материалы, включая частицы воды и пыли в воздухе, могут быть трибоэлектрически заряжены. Сколько заряда генерируется, куда он направлен и как быстро стекает – зависит от физических, химических и электрических характеристик материала [429]. Таким образом, электризация – это способность материалов накапливать на поверхности заряд.

+	Положительно	Мех кролика
		Стекло
-	Отрицательно	Слюда
		Волос человека
		Нейлон
		Шерсть
		Мех
		Свинец
		Шёлк
		Алюминий
		Бумага
		Хлопок
		Сталь
		Дерево
		Янтарь
		Сургуч
		Никель, медь
		Латунь, серебро
		Золото, платина
		Сера
		Ацетатное волокно
		Полиэстер
		Целлулоид
		Кремний
		Тефлон

Рис. 2.2. Типичный трибоэлектрический ряд [65, 68]

Электризация материалов может происходить при трении поверхностей двух диэлектриков или передаче диэлектрику зарядов определенного знака от заряженного тела.

При трении материалов на поверхности образуются и накапливаются положительные или отрицательные заряды (табл. 2.1) [58], которые определяются химическим составом полимерного вещества материала.

Трибоэлектричество используется в технике. Известен электростатический генератор Ван-де-Графа (1931 г.), в котором движущаяся лента переносит заряд на высоковольтный электрод. Таким образом, достигается напряжение ~ 15-20 ГВ, позволяющее ускорять заряженные частицы [133].

У тканей смешанного волокнистого состава (хлопкокапроновая, хлопкоацетатная) плотность электрических зарядов меньше по сравнению с тканями только из капроновой, ацетатной или другой однородной пряжи. Физика образования и накопления статического электричества у всех материалов практически одинакова.

Табл. 2.1. Трибоэлектрический ряд материалов (по данным А.И. Меркуловой) [58]

Материал*	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
1	/	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
2	—	/	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
3	—	—	/	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
4	—	—	—	/	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
5	—	—	—	—	/	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
6	—	—	—	—	—	/	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
7	—	—	—	—	—	—	/	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
8	—	—	—	—	—	—	—	/	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
9	—	—	—	—	—	—	—	—	/	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
10	—	—	—	—	—	—	—	—	—	/	+	+	+	+	+	+	+	+	+
11	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	/	+	+	+	+	+	+	+	+
12	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	/	+	+	+	+	+	+	+
13	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	/	+	+	+	+	+	+
14	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	/	+	+	+	+	+
15	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	/	+	+	+	+
16	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	/	+	+	+
17	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	/	+	+
18	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	/	+
19	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	/

* 1 — мех натуральный; 2 — шерсть; 3 — шелк; 4 — полиамид; 5 — ацетат; 6 — вискоза; 7 — хлопок; 8 — лен; 9 — дерево; 10 — кожа человека; 11 — триацетат; 12 — полиэтилен высокого давления; 13 — пенополиуретан; 14 — полиэфир; 15 — полиакрилонитрил; 16 — пленка ПВХ; 17 — полиэтилен низкого давления; 18 — полипропилен; 19 — хлорин

Материалы можно разделить по электропроводности на следующие основные группы:

Изоляционные материалы, диэлектрики (insulative) стандарт [56] определяет их как «материалы с поверхностным или объемным сопротивлением, равным или превышающим $1,0 \cdot 10^{11}$ Ом». На поверхности изолятора может генерироваться значительное количество заряда, поскольку изоляционный материал не позволяет электронам быстро стекать, положительные и отрицательные заряды могут находиться на изолирующей поверхности одновременно, хотя и в разных местах [56, 65, 68, 429].

Проводящие материалы (conductive) стандарт [56] определяет их как «материал с поверхностным сопротивлением менее $1,0 \cdot 10^4$ Ом или объемным сопротивлением менее $1,0 \cdot 10^4$ Ом». Когда проводящий материал становится заряженным, заряд (т.е. дефицит или избыток электронов) будет равномерно

распределен по его поверхности. Заряд проводника располагается на его поверхности, а внутри проводника он отсутствует и напряженность ЭСП равна нулю. Если заряженный проводящий материал контактирует с другим проводящим материалом, электроны довольно легко распределяются между ними. Если второй проводник подключен к заземлению оборудования переменного тока или любой другой точке заземления, электроны будут стекать на землю, и избыточный заряд на проводнике будет нейтрализован. Электростатический заряд может быть создан трибоэлектрически на проводниках также, как он создается на изоляторах. Пока проводник изолирован от других проводников или земли, статический заряд будет оставаться на нем. Если проводник заземлен, заряд легко уйдет в землю. При этом подразумевается, что емкость земли значительно превышает емкость заряженного тела. Если же заряженный проводник контактирует с проводником другого электрического потенциала, заряд будет проходить между двумя проводниками [56, 65, 68, 429].

Рассеивающие материалы (dissipative) это по стандарту [56] «материал, поверхностное сопротивление которого больше или равно $1,0 \cdot 10^4$ Ом, но меньше $1,0 \cdot 10^{11}$ Ом, или объемное сопротивление больше или равно $1,0 \cdot 10^4$ Ом, но меньше $1,0 \cdot 10^{11}$ Ом». Электронный поток может проходить через рассеивающий материал, но он контролируется его поверхностным или объемным сопротивлением. Как и в случае с двумя другими типами материалов, заряд может генерироваться трибоэлектрически на материале, рассеивающем статическое электричество. Однако, как и проводящий, материал, рассеивающий статическое электричество, позволяет передавать заряд земле или другим токопроводящим объектам. Переход заряда от материала, рассеивающего статическое электричество, обычно занимает больше времени, чем от эквивалентного размера проводящего. «Трансфер» заряда от материалов, рассеивающих статическое электричество, происходит значительно быстрее, чем от изоляторов, и медленнее, чем от проводящих материалов [56, 65, 68, 429].

Заряженные материалы также имеют электростатическое поле и связанные с ним силовые линии [65, 68]. Проводящие объекты, находящиеся вблизи этого ЭСП,

будут поляризоваться в результате процесса, известного как индукция. Отрицательное ЭСП будет отталкивать электроны на поверхности проводящего предмета, на который воздействует поле. Положительное ЭСП будет притягивать электроны вблизи поверхности, оставляя другие области положительно заряженными. Никакого изменения фактического заряда предмета при поляризации не произойдет. Однако, если элемент является проводящим или рассеивающим и подключен к заземлению в поляризованном состоянии, из-за дисбаланса заряд будет стекать. Если заземляющий контакт разъединить, а затем снять электростатическое поле, заряд на предмете останется. Если непроводящий объект помещается в ЭСП, электрические диполи будут стремиться выровняться с полем, создавая кажущиеся поверхностные заряды. Непроводник (изоляционный материал) не может заряжаться индукцией [429].

В однородном ЭСП при нормальных условиях развитие электрических зарядов начинается при напряженности ЭСП около 3000 кВ/м. В реальных условиях однородные поля встречаются редко. Энергетические системы, технологическое оборудование и подвергающиеся обработке изделия, как правило, имеют самую разнообразную конфигурацию, что приводит к неравномерному распределению зарядов и их концентрации на выступающих частях. В этих зонах создаются высокие напряженности поля, часто превышающие пробивное для воздуха напряжение. В зависимости от величины напряженности и степени неоднородности поля может произойти полный (искровой разряд) или частичный (коронный) [57] электрический пробой.

Таким образом, основные причины и механизмы появления электростатических разрядов сводятся к следующему:

- практически все материалы, в том числе и проводники, могут быть заряжены трибоэлектрически;
- на величину заряда влияет тип материала, скорость контакта и разделения, влажность и ряд других факторов;
- заряженные объекты имеют электростатические поля;

- электростатический разряд может возникать во время производства, испытаний, транспортировки, погрузочно-разгрузочных работ или эксплуатации, а также при обслуживании технологических объектов на месте.

Наряду с этим эффективность мероприятий по реализации управления уровнями защиты от ЭСР определяется оценкой воспламеняющей способности искровых разрядов статического электричества [59, 430].

Энергия искры ($W_{\text{и}}$, Дж), способной возникнуть под действием этого напряжения (или напряжения между пластиной и каким-либо заземленным предметом), может быть оценена по запасенной конденсатором энергии [59, 430]:

$$W_{\text{и}} = 0,5 * C * U^2, \quad (2.9)$$

где $W_{\text{и}}$ – энергия искры, Дж;

U – напряжение, В;

C – емкость конденсатора, пФ.

Поэтому воспламеняющую способность искровых разрядов характеризуют в основном их энергией. Однако формула (2.4) не может быть использована для расчета энергии разряда между заряженными поверхностями, если часть накопленного заряда на диэлектрике переносится в разряде [59, 430].

Нахождение полной энергии, выделенной в разряде, представляет значительную трудность, поскольку заряженные диэлектрики имеют не эквипотенциальную поверхность. Кроме того, поверхность заряженного диэлектрика, которая отдает заряд, не имеет точных размеров [430].

В некоторых случаях для приближенной оценки энергии разрядов статического электричества с диэлектрических поверхностей применяют методы непосредственного контроля искровых разрядов статического электричества (на слух, по физиологическому воздействию, визуально и фотографированием и др.), аналитические, а также экспериментальное воспламенение горючих смесей электростатическими разрядами. Следует отметить, что экспериментальное исследование воспламеняющей способности электростатических разрядов является наиболее объективным методом оценки их энергии [430].

Реальная воспламеняющая способность электрической искры зависит от концентрации, температуры и давления взрывоопасной смеси. Условием воспламенения (взрыва) такой смеси от искры статического электричества является [59, 430]:

$$W_{\text{и}} > W_{\text{мин.восп.}}, \quad (2.10)$$

где $W_{\text{и}}$ – энергия разряда статического электричества с заряженного материала (зависит от свойств материала, конструкции аппарата, технологического процесса и др.);

$W_{\text{мин.восп.}}$ – минимальная энергия зажигания горючей смеси, образование которой возможно в данном технологическом процессе (зависит только от свойств горючей смеси и является характеристикой чувствительности ее к воспламенению), определяется экспериментально.

Обычно минимальная энергия воспламенения пылевоздушных взрывоопасных смесей, выше энергии, воспламеняющей паровоздушные взрывоопасные смеси [430]. Например, для многих паро- и газовоздушных взрывоопасных смесей $W_{\text{мин.восп.}}$ составляет 0,009-2,000 мДж, а для пылевоздушных – 10-250 мДж [407]. Разряды статического электричества не в состоянии воспламенить смеси с минимальной энергией воспламенения - 100 мДж и выше.

Средняя напряженность ЭСП, при которой возможен разряд, составляет $4 \cdot 10^2$ - $5 \cdot 10^2$ кВ/м - для резко неоднородного, $1,5 \cdot 10^2$ – $20 \cdot 10^2$ кВ/м - для слабонеоднородного и до $30 \cdot 10^2$ кВ/м - для однородного [59, 430].

При разности потенциалов 3 кВ искровой разряд может воспламенить почти все горючие газы, а при 5 кВ – большую часть горючих пылей.

Статическое электричество может вызвать воспламенение взрывоопасной смеси при сочетании следующих условий:

- наличии источника статических электрических зарядов;
- накоплении значительных зарядов на контактирующих поверхностях;
- достаточной разности потенциалов для электрического пробоя среды;
- наличии достаточной запасенной электрической энергии;
- возможности возникновения электрических разрядов [430].

Отсутствие любого из них исключает опасность статического электричества.

Условие безопасности от статического электричества может быть выражено неравенством:

$$W_{\text{и}} \leq 0,4 W_{\text{мин.восп.}}, \quad (2.11)$$

В пожаро- и взрывоопасных производствах реальную опасность представляет «контактная» электризация людей, работающих с движущимися диэлектрическими материалами (например, при прорезинивании тканей, обрезинивании кордов на каландрах, обработке синтетических тканей и нитей, полимерных пленок). На человеке накапливается статическое электричество, которое при соприкосновении его с заземленным предметом вызывает искры, а в случае наличия в воздухе горючих газов или аэрозолей возможно воспламенение. Энергия разряда этой искры может составлять 2,5-7,5 мДж [430]. Кроме того, такой разряд оказывает неприятное физиологическое воздействие на человека, вызывая слабые, умеренные или сильные уколы или удары, зависящие от энергии разряда. Сила тока, проходящего через тело человека при этом незначительна, поэтому такие разряды непосредственную опасность не представляют.

Но известны случаи [59, 430] с тяжелым исходом, когда искра, проскакивающая между телом человека и заряженным объектом, вызывала испуг, сопровождавшийся нескоординированными движениями, что приводило к соприкосновению с неогороженными вращающимися частями машин, падению с высоты. Длительное воздействие статического электричества является причиной ряда заболеваний. Расчетная зависимость, показывающая, при каком значении потенциала возникают угроза физиологического воздействия на человека и опасность воспламенения горючих смесей, представлена на рис. 2.3 [430].

Границы зон видов физиологического воздействия условны, так как оно зависит от особенностей человеческого организма и специфики производства, поэтому допустимым потенциалом на человеке по физиологическому воздействию считают $\varphi_{\text{доп}} = 4-6$ кВ. Допустимый же потенциал пожаро- и взрывоопасности для некоторых сред определяется непосредственно по кривой (см. рис. 2.3).

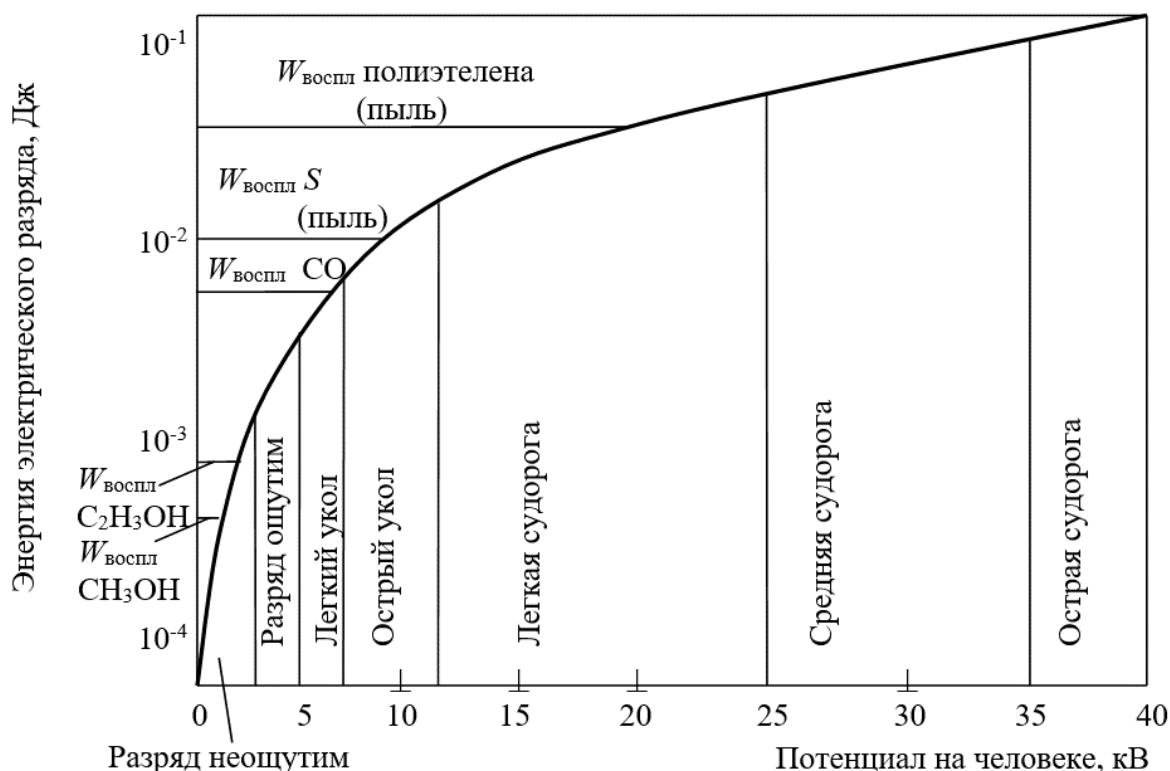


Рис. 2.3. Зависимость энергии электрического разряда с тела человека и физиологического воздействия от потенциала зарядов статического электричества [59]

Таким образом, электростатическая безопасность (ЭСБ) – это концепция, которая охватывает меры и практики, направленные на предотвращение негативных последствий, связанных с накоплением и разрядом статического электричества в различных средах и приложениях.

ЭСБ объектов определяют показатели [382], представленные на рис. 2.4.

Чтобы исключить формирование воспламеняющих разрядов с человека, необходимо обеспечить быструю утечку зарядов. С этой целью уменьшают сопротивление обуви и пола. В производствах, где существует опасность воспламенения взрывоопасных смесей разрядом с человека, необходимо обеспечивать работающих электропроводящей (антистатической) обувью (например, с кожаным верхом и подошвой из электропроводящей резиновой пластины). Обувь считается электропроводящей, если электрическое сопротивление между электродом в форме стельки, находящейся внутри обуви, и наружным электродом меньше 10^7 Ом [430].



Рис. 2.4. Показатели электростатической безопасности объектов

Особое внимание устранению электрического заряда с человека следует уделять при выполнении некоторых ручных операций (промывка, чистка, протирка, проклеивание, прорезинивание) с применением бензина, бензола, ацетона, резинового клея и т.п [430]. Для этого немаловажно знать методы измерения электростатического поля и антистатических характеристик материалов одежды и обуви [65].

В связи с применением диэлектрических и электризующихся материалов, электроустановок, телеаппаратуры, дисплеев и т.п. ведется широкое изучение влияния ЭСП на различные живые системы и организмы [430]. Однако эта проблема еще не решена, и в настоящее нет определенных ответов на целый ряд вопросов. Имеющиеся сведения о биологическом действии названного фактора носят разноречивый характер, при этом некоторые из них недостаточно убедительны. Вероятно, это связано с тем, что в большинстве опубликованных работ физические и моделируемые условия, в которых проводились эксперименты, или описаны поверхностно, или отсутствуют вовсе [96].

Нередко игнорируются значительные возможные вторичные проявления моделирования, методика исследования, характеристика тест-объектов [71]. Кроме того, электростатическое поле может проявлять биологическую активность по-разному в зависимости от уровня напряженности, длительности воздействия, температуры среды и направленности силовых линий.

Насколько сильно влияет электростатическое поле на здоровье человека [71] сложно точно утверждать.

Исследования биологической активности электростатического поля охватывают различные уровни функционирования организма – от клеточных до высших отделов. В табл. 2.2 представлены некоторые результаты изучения действия ЭСП на организм животных.

Табл. 2.2. Биологическое влияние ЭСП на молекулярном и клеточном уровнях [71, 96]

Объект исследования	Напряженность, кВ/м	Время воздействия	Произошедшие изменения
1	2	3	4
1.Мозг быка: Макромолекулы холестерина, Смеси лецитина и холестерина, Фосфолипиды белого вещества	100-1000	1,5 часа	ЭСП повлияло на функциональное состояние клетки. Произошли: поляризация и структурные перестройки макромолекул
2.Сывороточный альбумин человека			
3.Суспензия эритроцитов	300<	1,5 часа	Изменения калий-натриевого насоса мембран. Это приводило к нарушению общего метаболизма клеток
4.Суспензия пурпурных мембран и бактериородопсин	Интенсивное (нет точных данных)	Кратковременное (нет точных данных)	Повышение проницаемости клеточных мембран
5.Сухие волокна ДНК	260	(нет точных данных)	Структурные перестройки
6. Клетки разных органов и ткани крыс	45-50	18-24 часа	Изменения ультрамикроскопической структуры гепатоцитов, уровня сорбционных процессов, стимуляция обменных процессов

1	2	3	4
7. Крысы	100	24 часа	Временные изменения в молекуле оксигемоглобина. Через 2 недели произошло возвращение к исходному уровню.
	150	1 месяц	Уменьшение количества ионов К и Na в эритроцитах и увеличение их в плазме
	30	1 месяц	Увеличение количества ионов К в эритроцитах и плазме, уменьшение количества ионов Na
	15	3 месяца	Снижение активности цитохромоксидазы в гомогенате печени и мозга, повышение активности надосадочной фракции
8. Биологическая мембрана эритроцита	1,5	5 импульсов за 40 мкс	Выход цитоплазматических белков из эритроцита во внешнюю среду. Скорость процессов зависела от напряженности, числа и длительности импульсов, температуры и концентрации клеток.

В табл. 2.3 приведены некоторые результаты исследований влияния ЭСП на системном и организменном уровнях.

Табл. 2.3. Влияние ЭСП на системном и организменном уровнях [71, 96]

Объект исследования	Напряженность, кВ/м	Время воздействия	Произошедшие изменения
1	2	3	4
1. Мыши	200	24 часа	Уменьшение иммунных и розеткообразующих клеток в селезенке, снижение уровня гемолизинов в периферической крови, изменения функционального состояния макрофагов
2. Лимфоидные ткани крыс	15 и 50	1,3,4 недели 2 месяца	Снижение иммунитета организма
3. Мозг	130	5 дней	Нарушения электрической активности коры и глубоких структур. Через 5 дней после прекращения воздействия происходило возвращение к нормальному уровню.

1	2	3	4
4. Условно-рефлекторная деятельность и поведенческие реакции крыс	30	3 месяца	Ослабление возбудимости ЦНС
	80	3 месяца	Повышение возбудимости в корковых центрах
5. Мыши	250	12 часов	Изменение функциональной деятельности надпочечников и щитовидной железы
	50-250	С момента рождения, постоянно	Увеличение продолжительности жизни
	150		Увеличение массы при рождении до 1 месячного возраста, затем при увеличении возраста наблюдалось обратное явление – уменьшение массы.

Помимо приведенных выше данных имеются результаты исследований влияния ЭСП на генетический аппарат и генеративные функции. Однако все эти разработки не позволяют получить точную оценку влияния ЭСП на здоровье человека [71].

Замечено, что даже колебания фоновой величины ЭСП атмосферы в пределах 150 – 2000 В/м может вызывать у человека ухудшение самочувствия, а постоянно действующие поля выше фоновых значений причинить вред его здоровью.

Воздействие ЭСП на молекулярном и клеточном уровнях приводит к ряду биологических изменений в организме человека: нарушаются молекулярные структуры; изменяется проницаемость клеточных мембран, ферментативная активность и ионный состав крови. При величине ЭСП выше 200 кВ/м обнаружены перестройки сухих волокон ДНК, поляризация молекул и тканей. При этом наблюдается снижение активности печени и мозга, уменьшаются иммунные и розеткообразующие клетки селезенки, нарушается общий первичный иммунитет [97-98, 102, 105-111, 113-114, 115-116].

Работники, систематически подвергающиеся воздействию токов статического электричества, страдают нервными расстройствами [149]. При обследовании рабочего персонала, длительно работающего в сфере действия электростатического поля, отмечены повышение пораженности болезнями нервной и сердечно-сосудистой систем, жалобы на повышенную утомляемость, раздражительность, ухудшение памяти, плохой сон, головную боль и неприятные субъективные ощущения [134, 135]. Так, в работе [136] при клиническом

обследовании служащих междугородной телефонной станции, где электризуемость тела обследованных, а также покрытий полов на основе полихлорвинилового линолеума, достигала 10-30 кВ, у 71% работающих наблюдались функциональные нарушения нервной, а у 44% - сердечно-сосудистой системы [114]. Кроме того, при опросе служащие жаловались на головную боль, повышенную раздражительность и утомляемость, боль в области сердца, которые усиливаются в течение рабочего дня.

По мнению ряда исследователей, влияние поля в основном определяется стрессами, развивающимися при действии на человека кратковременных разрядных токов, приводящих к ответным реакциям в организме. Если значение потенциала человека под воздействием электростатического поля или за счет образования объемных зарядов не превышает 2,3 кВ, а напряженность ЭСП – 37 кВ/м, то имеющие место искровые разряды не вызывают неприятных ощущений и не оказывают заметного отрицательного действия [114, 145].

У работающих с 10-20-летним стажем в производстве пластмасс, выявлены изменения, свидетельствующие о повышенной физической и психической утомляемости, эмоциональной неустойчивости, дистимическом фоне настроения, то есть симптомокомплексе раздражительной слабости на фоне общей астенизации. Обнаружены также функциональные изменения сердечно-сосудистой системы – неустойчивость артериального давления (чаще гипертония), брадикардия, снижение вольтажа ЭКГ [137].

Институтом охраны труда установлено [138], что электростатическое поле напряженностью 60 кВ/м приводит к снижению артериального давления и частоты пульса. Действие электростатического поля напряженностью 90 кВ/м на эти показатели было более выраженным: понизились тонус сосудов и давление крови. Кроме того, количество тромбоцитов крови отмечалось на нижней границе нормы. Изменения удерживались в течение недели после прекращения действия поля и были оценены как неблагоприятные. При более слабых полях изменений не зарегистрировано.

В числе биоэффектов электростатического поля особо значимы исследования центральной нервной системы, поскольку, по мнению ряда специалистов, она по сравнению с другими системами организма является наиболее чувствительной к действию электромагнитных полей. Вместе с тем порог чувствительности центральной нервной системы оценивается в довольно широких пределах – от 15 до 250 кВ/м. Так, имеются сведения, что электростатическое поле напряженностью 130 кВ/м после 5-дневной экспозиции приводило к нарушению электрической активности коры и глубоких структур мозга, которые фиксировались методом электроэнцефалографии. Изменения, регистрируемые в центральной нервной системе в ответ на воздействие электростатического поля, часто сопровождаются нарушением нейроэндокринной системы [113-114].

Отдельные публикации о воздействии электростатического поля на человека имеются и в зарубежной литературе. Так, была обследована группа студентов в возрасте 25 лет, подвергшихся воздействию электростатического поля (1 и 10 кВ/м). При этом оценивалась скорость реакции на внимание. Анализ результатов показал, что скорость реакции испытуемых, находящихся в ЭСП, как правило, не отличалась от таковой в контроле. Однако в некоторых случаях у нескольких испытуемых, находящихся в поле 1 кВ/м, наблюдалось улучшение внимания [140].

В Германии [141] с помощью психологических тестов на внимание в школе и больших производственных помещениях изучали действие электростатического поля напряженностью от 1 до 30 В/м в комплексе с электрическим полем переменного тока частотой 10 Гц. Установлено, что комплекс физических факторов положительно воздействует на испытуемых как в помещении школы, так и в больших производственных помещениях. Причем в школе внимание испытуемых улучшилось на 3-8%.

В работе [142] показано, что у водителей автомобиля, находящихся в статическом и переменном электрическом поле низких уровней напряженности, улучшается внимание. Опубликованы также результаты исследований, в которых не удалось обнаружить отклонений в физическом, психическом и эмоциональном статусе лиц, работающих в зоне повышенной напряженности электростатического

поля (345 кВ/м) и добровольцев, находящихся в поле, аналогичном существующим внутри помещений [143].

Человек ощущает воздействие тока, когда сила тока составляет несколько миллиампер. Ток свыше 10 мА считается опасным для организма. Работники, систематически подвергающиеся воздействию токов статического электричества, страдают нервными расстройствами [149].

Постоянно действующие поля и токи любой величины могут приносить вред здоровью человека. При разработке мер безопасности для работников нужно учитывать, что электризация человека может быть контактной, трибоэлектрической и индуктивной.

При ходьбе по полу возможна как контактная, так и трибоэлектризация: прикосновение обуви человека обуславливает контактную электризацию, а при движении ног возникает трибоэлектризация вследствие трения между обувью и поверхностью. Электризация как одежды, так и поверхности тела человека происходит в процессе одевания и особенно снятия одежды из-за трения между ними, т.е. наблюдается трибоэлектризация. Особенно значительная электризация наблюдается при быстром отделении частей тела человека от волокнистого материала – заряды не успевают стекать. Именно поэтому при быстром снятии одежды из синтетических волокон возникает искрение. Возникшие заряды на человеке могут сохраняться длительное время, если подошва обуви выполнена из диэлектрических материалов. Если наэлектризованный человек прикоснется или близко подойдет к какому-либо объекту, особенно заземленному, то между ними возникает разряд. Он может обусловить отрицательные последствия психологического и физиологического характера, а также быть источником возгорания или взрыва в соответствующих помещениях [114]. Особенно опасны отрицательные проявления электростатических явлений в зимнее время, когда наблюдается пониженная относительная влажность воздуха. Величина потенциала электростатического поля человека в это время года может достигать 16 кВ [139]. По мере увеличения потенциального напряжения, увеличивается и интенсивность

ощущений человека (табл. 2.4), это также означает, что риск травмы и серьезных физиологических последствий возрастает.

Табл. 2.4. Ощущения человека, вызываемые разрядами различных потенциалов [412]

Ощущение человека	Потенциал разряда, кВ
Разряд осязаемый	2,5 – 5
Укол легкий	5 – 7
Укол острый	10
Судорога легкая	12,5 – 25
Судорога средняя	25 – 35
Судорога острая	35 – 40

Чтобы потенциал человека не возрастал до значений, при которых, например, возникает разряд, необходимо обеспечить сток с него зарядов. С этой целью проводимость человека в комплексе с обувью должна быть достаточной. Например, изготавливать подошву из проводящего материала [144]. Искра, возникающая между телом человека и волокнистым материалом, маломощна, так как последний взаимодействует с телом на незначительной по площади зоне, с очень малой электрической емкостью. Более существенен разряд между человеком и оборудованием большой емкости. В табл. 2.5 указана электризуемость ряда обувных подошвенных материалов [146].

Табл. 2.5. Электризуемость обувных материалов

Наименование материала	Напряженность электростатического поля материалов (E), В/см и знак зарядов при трении ($\pm$)							
	По дереву (некрашеному)		По линолеуму ПВХ		По трикотажу хлопчатобумажному		По трикотажу шерстяному	
	$\pm$	E	$\pm$	E	$\pm$	E	$\pm$	E
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Подошвенная кожа хромтаннидного дубления	–	200	–	–	–	–	–	–
Черная пористая резина марки В	–	867	+	3200	–	–	–	–
Кожволон	–	3040	+	6347	–	–	–	–

1	2	3	4	5	6	7	8	9
Выросток хромовый (без покрытия)	—		—		—	435	—	6027
Синтетическая кожа	—		—		—	7360	—	8640

Обувь должна обладать высоким сопротивлением. Однако в случаях, когда по условию технологического процесса работник соприкасается с тканью или рулоном ткани, электрические заряды переходя на человека, скапливаются. В этом случае лучше иметь проводящую обувь и пол, которые обеспечат утечку зарядов с человека. Следует отметить, что воздействия, которые приводят к измеряемым биологическим эффектам, не выходящим за пределы физиологической компенсации организма и не ухудшающим физическое и умственное состояние человека, по мнению специалистов, могут считаться не опасными для здоровья

Таким образом, несмотря на имеющиеся результаты ряда исследований, свидетельствующие о воздействии электростатического поля на состояние здоровья работающих, формализованные методы оценки его опасности отсутствуют.

Кроме того, из изложенного выше можно заключить, что при оценке воздействия электростатического поля на состояние здоровья работающих в различных условиях нужно иметь либо обувь, произведенную из рассеивающих материалов, либо проводящие полы. Поэтому в следующем разделе диссертации представляются как новый экспериментальный метод исследования электростатических показателей обувных материалов, составляющих большинство конструкций, так и методика их измерения в различных условиях эксплуатации изделий.

2.2. Разработка метода и методики измерения показателей электростатических свойств обувных материалов

Проведенный анализ [54, 65] измерителей ЭСП, методов и установок для изучения электростатических свойств материалов показал, что существует

ограниченное число методик [114]. Некоторые из них либо морально устарели, так как основаны на использовании измерительных средств с низкими метрологическими характеристиками, серийный выпуск которых прекращен [114, 352-355], либо определяют ограниченное число характеристик (электростатический потенциал, напряженность ЭСП) (табл. 2.6). Измерители с неподвижным зондом [409, 410, 411] можно использовать только для измерения постоянных полей. Наиболее удобны для измерения постоянно меняющихся полей измерители с подвижным зондом [114].

Табл. 2.6. Характеристики приборов с индукционным измерительным преобразователем с неподвижным зондом

Характеристика	ИЭСП-5Ц	ИЭСП-6	ИЭСП-7
Диапазон измерения:			
- электростатического потенциала, кВ	—	0,1 – 10	—
- напряженности ЭСП, кВ/м	1 – 1000	—	2 – 199,9
Напряжение питания прибора, В	$9,0 \pm 1$	9 ± 1	9 ± 1
Потребляемый ток, мА, не более	2	1,5	1,5
Погрешность, %, не более	± 15	± 10	± 10
Масса, кг, не более	0,36	0,36	0,36
Определение знака:			
- потенциала	—	есть	—
- заряда	есть	—	есть
Рабочие условия эксплуатации:			
- температура окружающего воздуха, °С	0 ... +30	+10 ... +25	+10 ... +35
- относительная влажность воздуха, %, не более	98	80	80
- атмосферное давление, кПа	84 - 106	84 - 106,7	70 - 106

В связи с этим к основным недостаткам рассмотренных методов исследования трибоэлектрических свойств материалов следует отнести [114]:

- отсутствие технической возможности непрерывной регистрации динамики изменения ЭСП на поверхности образца;
- наличие неоднородного ЭСП не позволяющего корректно регистрировать динамику изменения заряда по поверхности материала;

- метрологические характеристики испытательных стендов не позволяют корректно регистрировать параметры ЭСП (поверхностная плотность заряда и т.д.);
- отсутствие возможности изучения трибоэлектрических свойств материалов в различных климатических условиях.

Поэтому необходимы новые экспериментальные методики, позволяющие измерять электростатические показатели для обувных материалов в различных условиях эксплуатации. Кроме того, современные приборы для измерения параметров ЭСП созданы на базе микропроцессорной техники, которая повышает производительность и точность измерений, позволяет автоматизировать процесс и обработку полученных данных [114].

Разработанный нами метод измерения накопления и релаксации электростатического заряда на образцах материалов при трении [356, 357] основан на том, что в процессе эксплуатации обуви проявляются две основные динамические фазы поведения электростатических зарядов на поверхностях отдельных деталей. Нарастание плотности заряда происходит внутри обуви, вследствие контакта материала на стопе с материалами подкладки, приводящими к ее зарядке. Спад заряда наблюдается при отсутствии натирания подкладки, когда стопа не движется относительно ее материала [114].

Заряд, накапливаемый подкладочными материалами, можно определить из условия его увеличения за счет натирания и релаксации (стекания):

$$dQ/dt|_{\text{общ}} = dQ/dt|_{\text{вх}} + dQ/dt|_{\text{релакс}}. \quad (2.12)$$

где Q – величина заряда, Кл;

t – время стекания заряда, с;

Релаксация заряда происходит по экспоненциальной зависимости:

$$Q(t) = Q_0 e^{-t/\tau}, \quad (2.13)$$

где τ – постоянная времени релаксации заряда, с;

Решением уравнения является: $dQ/dt|_{\text{релакс}} = -(Q_0/\tau) e^{-t/\tau} = -Q/\tau$.

Перепишем исходное уравнение, исходя из того, что $dQ/dt|_{\text{вх}} = I_{\text{вх}}$

$I_{\text{вх}}$ – входной ток, А.

$$dQ/dt|_{\text{общ}} = I_{\text{вх}} + (-Q/\tau).$$

Решением дифференциального уравнения является:

$$Q = I_{\text{вх}} \tau (1 - e^{-t/\tau}). \quad (2.14)$$

Анализ уравнения (2.14) показывает, что при достаточно продолжительном натирании материала, когда время t намного больше постоянной времени релаксации τ , величина заряда Q достигает равновесия ($Q_p = I_{\text{вх}} \tau$). Численное значение экспоненты в скобках при этом стремится к нулю. Из этого следует, что:

$$I_{\text{вх}} = Q_p / \tau, \quad (2.15)$$

где Q_p – равновесный заряд, Кл.

После прекращения натирания релаксация заряда происходит по экспоненциальной зависимости (2.13) [114]. По результатам измерения зависимости спада заряда от времени можно оценить величину постоянной времени релаксации заряда из соотношения:

$$\tau = (t_1 - t_2) / \ln(Q(t_1) / Q(t_2)), \quad (2.16)$$

где $Q(t_1)$, $Q(t_2)$ – величины заряда на поверхности образца для значений времени t_1 и t_2 , Кл.

Постоянная времени релаксации (τ , с) – важный показатель безопасности, с точки зрения электризации при трении. Она зависит от объемного и поверхностного сопротивления исследуемых материалов, а также параметров среды между контактирующими поверхностями и достаточно однозначно характеризует электризацию изделия (табл. 2.7) [5, 382].

Считается, что значения ρ_v (удельное объёмное сопротивление) = 10^{10} Ом·м и ρ_s (удельное поверхностное сопротивление) = 10^{12} Ом являются граничными, выше которых материал статически электризуется, а ниже – не электризуется [5].

Табл. 2.7. Оценка электрических свойств материалов с точки зрения электростатической безопасности

Показатель	Значение				
τ , с	$< 0,5$	$0,5 - 2,0$	$2,0 - 10,0$	$10,0 - 100,0$	$> 100,0$
ρ_s , Ом	$\leq 10^{10}$	10^{12}	10^{14}	10^{15}	$\geq 10^{16}$
Оценка	отличное	хорошее	умеренное	плохое	отсутствует

Это соответствует значениям τ около 1 с, т.е. заряд, возникший на поверхности полимера, за одну секунду снижается в 2,7 раза, а за 2 секунды – примерно в 10 раз. Если $\rho_v \leq 10$ кОм·м – вещество практически не электризуется. Значения поверхностного электростатического заряда быстро снижаются, если $t > \tau$, и медленно изменяются во времени, если $t < \tau$ [5].

В случае, когда заряженная поверхность находится на обкладке плоского конденсатора, поверхностную плотность заряда можно вычислить из следующих соотношений [114]. Для плоского конденсатора выполняется формула:

$$E = Q / (\epsilon \epsilon_0 S), \quad (2.17)$$

где E – напряженность ЭСП, кВ/м;

S – площадь поверхности материала, м².

Учитывая, что поверхностная плотность электрических зарядов на материале рассчитывается по формуле (2.5) $\sigma = Q / S$,

$$\text{следовательно,} \quad \sigma = E \epsilon \epsilon_0. \quad (2.18)$$

Таким образом, для экспериментальной оценки основных физических параметров заряда Q и постоянной времени релаксации τ , характеризующих электризацию материалов, целесообразно использовать динамический метод накопления и спада заряда [114].

По результатам динамического исследования различных трибоэлектрических пар материалов и климатических условий испытаний экспериментально можно оценить величину заряда (Q , Кл), поверхностную

плотность заряда (σ , Кл/м²), постоянную времени релаксации заряда (τ , с) и входной ток ($I_{вх}$, А).

Нами разработан метод оценки накопления и релаксации заряда, для которого:

- выбрано устройство, позволяющее непрерывно накапливать на испытуемом материале в процессе трения электростатический заряд;
- образец материала располагается таким образом, чтобы можно было легко регистрировать изменяющуюся во времени поверхностную плотность заряда σ ;
- в качестве измерителя накопившегося заряда служит измеритель напряженности ЭСП типа флюксметр, регистрирующий изменения величины напряженности ЭСП E во времени;
- геометрия измерения напряженности ЭСП позволяет переходить от величины E к искомой Q [114].

Отличительную особенность разработанному методу придают дополнительные пластины конденсатора для создания однородного ЭСП.

Перечисленные выше условия позволили реализовать испытательный стенд на базе широко распространенного измерителя напряженности электростатического поля СТ-01 [358]. Измеритель имеет Сертификат и включен в Государственный Реестр средств измерений, позволяет контролировать параметры ЭСП, зафиксированные в действующих нормативных документах.

Разработанный испытательный стенд [356-357, 359, 360] (рис. 2.5) состоит из двух металлических пластин 1, исполняющих функцию конденсатора, связанных между собой стойками 7. Нижняя пластина имеет точку заземления 8. Образец испытуемого материала 3 размещают на нижней пластине и закрепляют зажимами-уголками 9. Электромеханический привод 6 сообщает поступательные движения планке 4, на которой закреплена контактная пара 5 – металлическая пластинка, обтянутая материалом, на которую устанавливаются грузики различной массы. Прибор 2 для измерения электростатического поля СТ-01, модулятор которого помещен непосредственно между пластинами конденсатора, установлен на отдельной подставке [114].

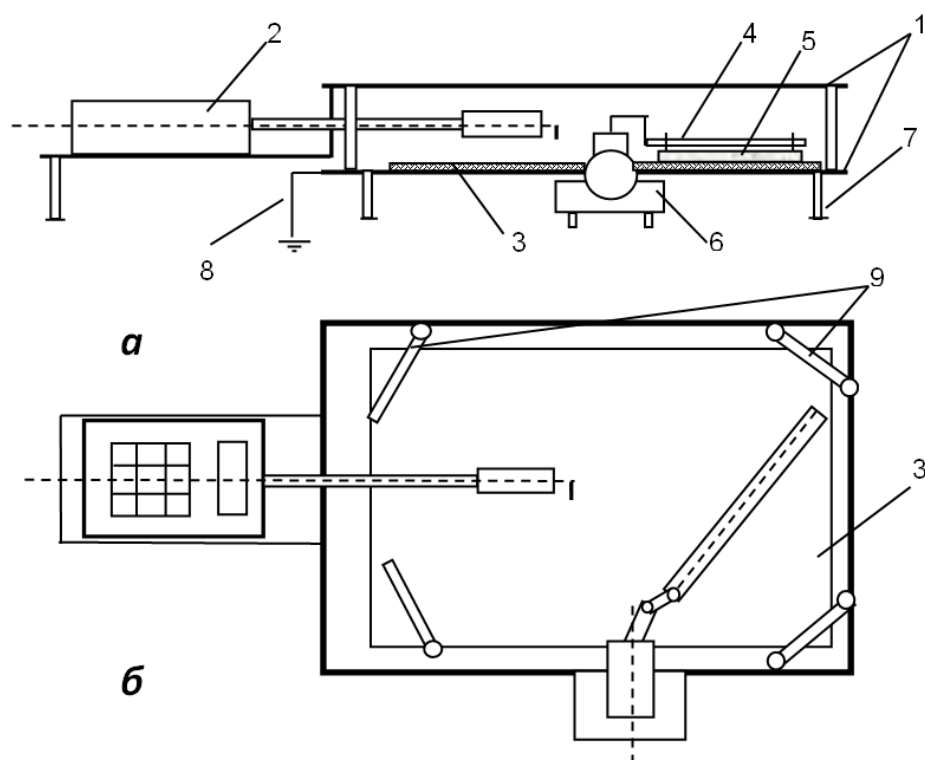


Рис. 2.5. Схема испытательного стенда: *а* - вид спереди; *б* - вид сверху, (верхняя пластина конденсатора снята): 1 – металлические пластины, выполняющие функцию конденсатора; 2 – измеритель ЭСП СТ-01; 3 – испытуемый материал; 4 – планка крепления контактной пары; 5 – контактная пара; 6 – электромеханический привод механизма контактной пары; 7 – стойки; 8 – точка заземления; 9 – узел крепления образца

В рабочий комплект испытательного стенда [114] входят следующие сопутствующие устройства и материалы:

- секундомер;
- измеритель влажности и температуры воздуха;
- прибор для индикации знака заряженной поверхности;
- блок низковольтного питания (преобразователь напряжения в электросети) (электромеханический привод контактной пары работает от 12 В);
- контактные пары с натянутыми на них разными материалами для испытаний;
- три грузика из свинцовых пластинок массой 0,56, 1,06 и 1,65 кПа, которые устанавливаются на контактную пару 5, для оказания давления на материал. Величины давления, оказываемые грузиками, обусловлены возможностями

испытательного стенда (расстоянием между пластинами и мощностью электропривода контактной пары) [114].

Основные технические характеристики и рабочие условия эксплуатации разработанного испытательного стенда представлены в табл. 2.8.

Табл. 2.8. Основные технические характеристики испытательного стенда

Показатели	Значение показателя
Диапазон измерения напряженности ЭСП, кВ/м	0,3 – 180
Размеры испытуемого образца обувного материала, мм	400 × 250
Размеры пластин конденсатора, мм	450 × 300
Размеры контактной пары, мм	200 × 10
Расстояние между пластинами, мм	100
Частота возвратно-поступательных движений контактной пары, циклов/с	0,5
Давление на образец материала, кПа	0 – 1,65
Допускаемая основная относительная погрешность измерения, %, не более	15
Рабочие условия эксплуатации: - температура окружающего воздуха, °С - относительная влажность воздуха, %, не более - атмосферное давление, кПа	+5 ... +40 90 70 ... 106

Испытуемый образец материала зажимами-уголками закрепляют на нижней пластине 1, контактную пару, обтянутую требуемым материалом, прикрепляют к планке 4. Для обеспечения нужного давления на планку поочередно устанавливаются грузики.

Подготовка стенда к испытаниям включает в себя проверку работоспособности прибора СТ-01, источника питания блока перемещения контактной пары, прибора для измерения температуры и влажности воздуха [114].

Работоспособность источника питания блока перемещения контактной пары после его включения в сеть проверяют по наличию напряжения на индикаторной лампочке. Далее фиксируют значения на измерителе влажности и температуры воздуха. Контактную пару устанавливают в рабочее положение и с помощью специальных барашков, установленных на винтах, проводят ее юстировку для лучшего прилегания контактной пары 5 к испытуемому образцу материала.

Порядок проведения испытаний продемонстрируем на примере исследования образцов овчины натуральной и искусственного меха [114].

Перед включением блока перемещения контактной пары 5 необходимо измерить первоначальное значение напряженности поля (фон испытуемого образца) в конденсаторе при наличии образца.

Сущность испытаний (циклов) сводится к измерениям фазы:

- насыщения электростатического заряда (при включенной контактной паре);
- спада заряда (при выключенной контактной паре) [114].

Критерием завершения первой фазы является отсутствие роста напряженности электростатического поля в пределах погрешности измерений – 15%. Далее блок перемещения контактной пары выключают и отслеживают динамику стекания заряда с поверхности наэлектризованного материала [114].

После того, как напряженность поля достигла уровня фона, фаза спада заряда считается завершенной и измерения можно прекратить [114].

На рис. 2.6 и 2.7 показаны типичные кривые накопления и релаксации заряда на поверхности образцов обувных подкладочных материалов, при нормальных условиях испытаний (температура 22⁰С, относительная влажность 65%). В качестве контактной пары 5 использованы носочно-чулочные изделия, которые надевались на стопу, так как именно этот материал непосредственно контактирует с внутренней поверхностью обуви [275].

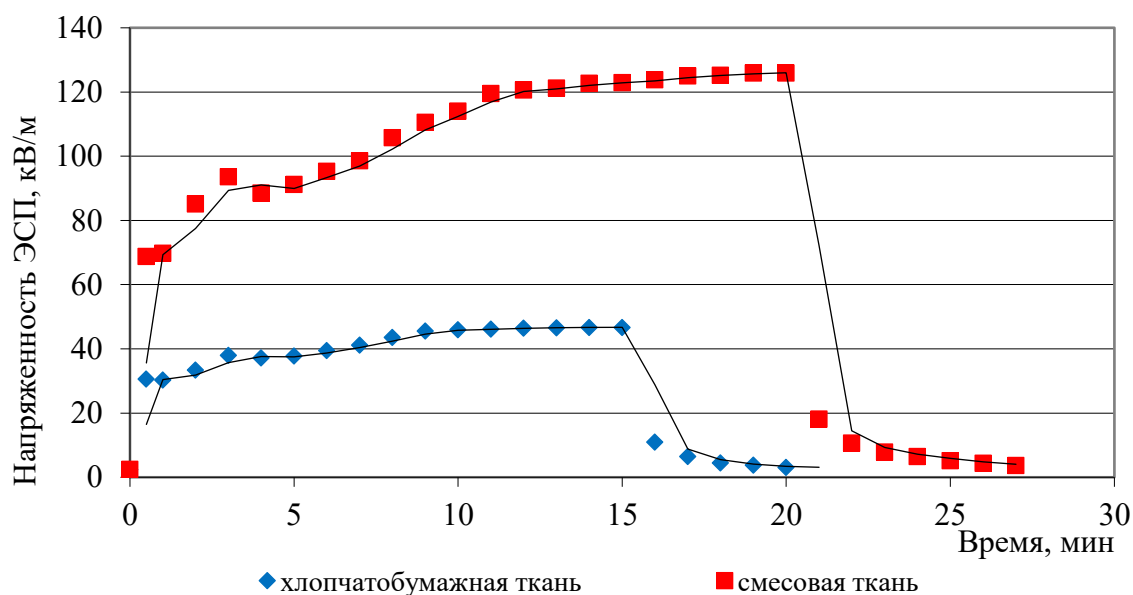


Рис. 2.6. Зависимость напряженности ЭСП на поверхности образца овчины натуральной от времени: контактные пары - х/б 100% (хлопчатобумажная ткань) и х/б – 30, полиамид (ПА) – 45, полиакрилонитрил (ПАН) – 25 (смесовая ткань)

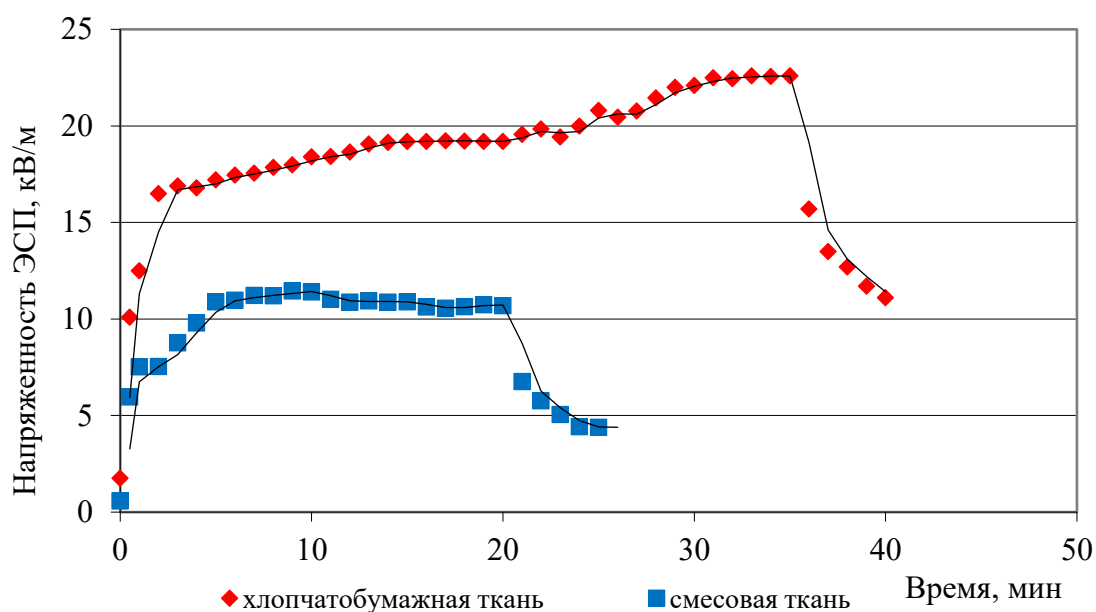


Рис. 2.7. Зависимость напряженности ЭСП на поверхности образца искусственного меха (ПАН – 60%, полиэстер (ПЭ) – 40%) от времени: контактные пары - х/б 100% (хлопчатобумажная ткань) и х/б – 30, ПА – 45, ПАН – 25 (смесовая ткань)

Режим электризации на установке отражает особенности биомеханики движений, совершаемых стопой внутри обуви. К основным типам активности стопы относят [114]:

- производственную деятельность;
- занятия спортом;
- ходьба.

На стенде воспроизведена такая активность стопы, при которой создаются наихудшие условия с точки зрения электростатической безопасности.

При производственной деятельности активность стопы велика, но человек периодически касается руками окружающих его предметов, таким образом, происходит разрядка не только через обувь, но и руки.

Во время спортивных занятий резкое возрастание активности стопы вызывает интенсивное потоотделение, повышающее влажность внутриобувного пространства, что способствует быстрому стеканию заряда [114].

В режиме спокойной ходьбы (со скоростью 3,5-4 км/час) человек совершает за час примерно 3600 шагов [361], т.е. каждую секунду внутри обуви и одежды

происходит взаимодействие материалов в виде трения поверхностей. Для режима ходьбы характерен незначительный контакт с землей (опора только на одну ногу), что позволяет отнести его к наиболее неблагоприятному варианту и именно он должен воспроизводиться на нашем экспериментальном стенде [114].

Таким образом, разработанный метод с использованием усовершенствованных приборов, обеспечивающих точные и автоматизированные измерения в различных климатических условиях, допускает получение достоверных эксплуатационных электростатических характеристик материалов наружных, промежуточных и внутренних деталей верха и низа обуви.

2.3. Исследования электростатических свойств материалов конструкций обуви

2.3.1. Исследования электростатических свойств материалов наружных деталей верха обуви

Ассортимент кожи для наружных деталей верха обуви очень широк и разнообразен. Выбор материала для наружных деталей верха обуви зависит от множества факторов: целевого использования обуви, климатических условий, модных тенденций и предпочтений конечного потребителя. На разработанном стенде проведены испытания наиболее распространенных материалов для верха обуви.

Характеристики образцов натуральной кожи представлены в табл. Б1, Приложение Б (нумерация образцов, принятая в Главе 2).

Максимальные значения напряженности ЭСП испытуемых образцов представлены на диаграмме [114], построенной по результатам исследований (рис. 2.8). Равновесное значение напряженности ЭСП при взаимодействии испытуемых образцов со смесовой тканью несколько выше, чем с хлопчатобумажной. Однако, учитывая, что показатели напряженности ЭСП во время испытаний не превышали 3 кВ/м (на порядок ниже порогового значения электризации 15 кВ/м), разницей

между показателями электризации обувных кож при контакте с различными тканями можно пренебречь.

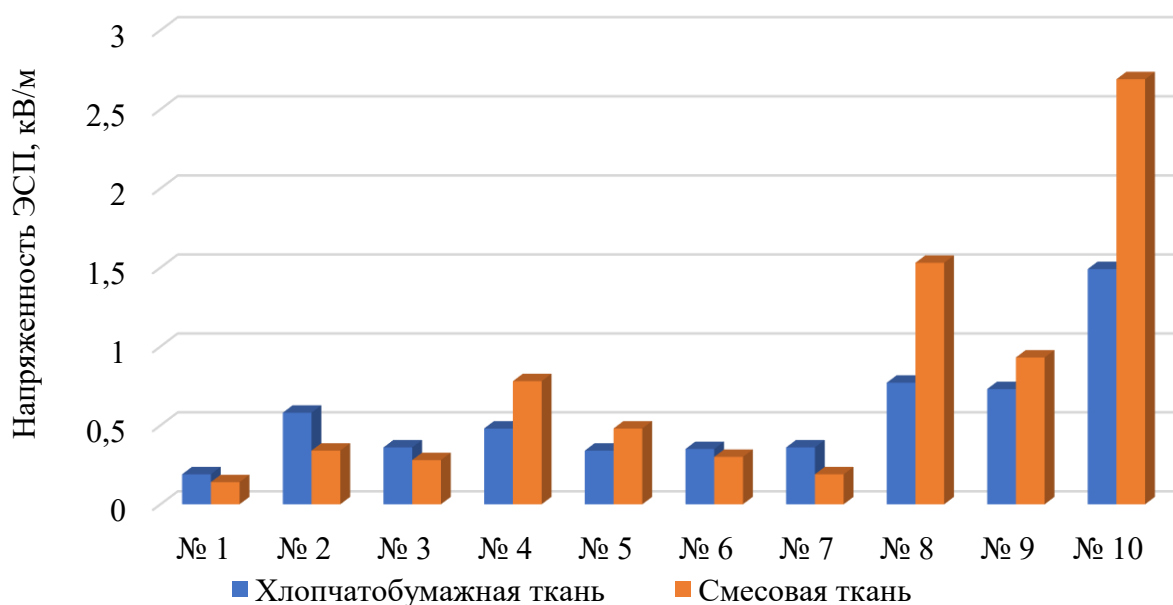


Рис. 2.8. Распределение равновесных значений напряженности ЭСП образцов натуральных кож для двух материалов контактной пары [114]

В табл. В1, Приложение В представлены трибоэлектрические характеристики всех испытанных образцов натуральных кож.

На следующем этапе исследования трибоэлектрических свойств материалов верха, выбраны искусственные и синтетические кожи отечественного производства, характеристики которых представлены в табл. Б2, Приложение Б. Условия испытаний и методика подготовки образцов искусственных и синтетических кож аналогичны условиям, для кож натуральных [114]. Разница в равновесных показателях напряженности ЭСП между образцами № 12-15 искусственных кож незначительна. Однако напряженность ЭСП на образце № 11 при взаимодействии с хлопчатобумажной тканью составляет почти 6 кВ/м (рис. 2.9). Это значение выделяется на общем фоне и, вероятнее всего, связано с толщиной, видом основы или поверхностной плотностью образца.

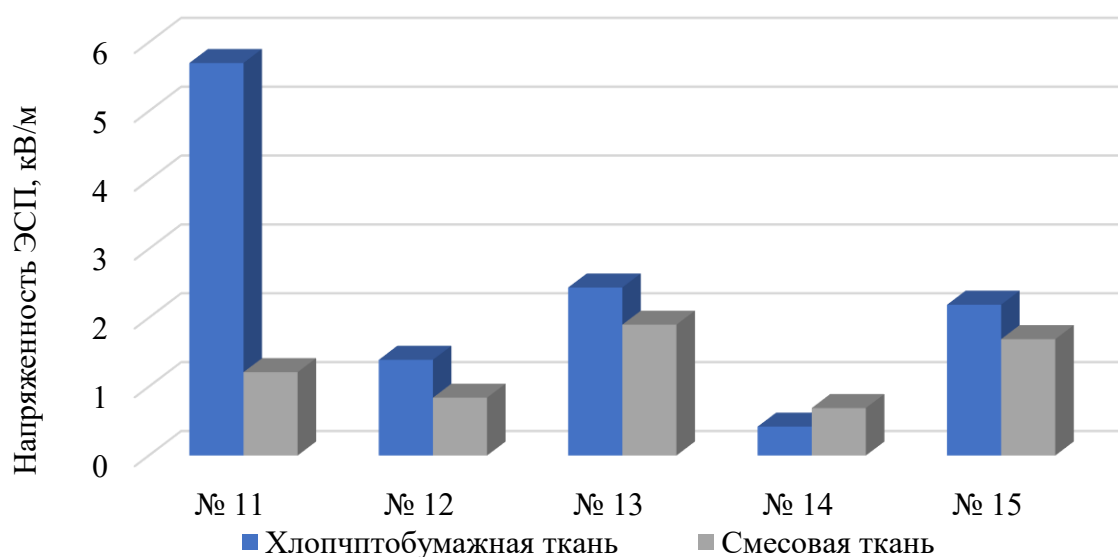


Рис. 2.9. Распределение равновесных значений напряженности ЭСП на образцах искусственной кожи для двух материалов контактной пары [114]

Отмечено, что степень электризации не зависит от стороны исследуемого материала, а при увеличении прилагаемого давления на исследуемый образец от 0,56 до 1,65 кПа величина напряженности ЭСП увеличивается на 20-25 %.

В табл. В2, Приложение В представлены трибоэлектрические характеристики всех образцов искусственных кож.

Наряду с этим в отдельных производствах используется войлочная обувь, которая обладает высокими теплозащитными и теплоизоляционными свойствами, обеспечивающими предохранение нижних конечностей от воздействия низких температур [378]. На рис. 2.10 представлены равновесные величины напряженности ЭСП, полученные при исследовании наиболее часто используемых в обувной промышленности войлоков (табл. Б3, Приложение Б). Испытания показали, что электризуемость образцов войлока в несколько раз (5-6) превышает электризуемость образцов натуральных и искусственных кож [195]. Напряженность ЭСП на поверхности образцов войлоков достигает пороговой величины 15 кВ/м практически на всех образцах (кроме № 16) при взаимодействии со смесовой контактной парой. Образцы № 18 и № 19 демонстрируют тенденцию роста напряженности ЭСП в зависимости от толщины.

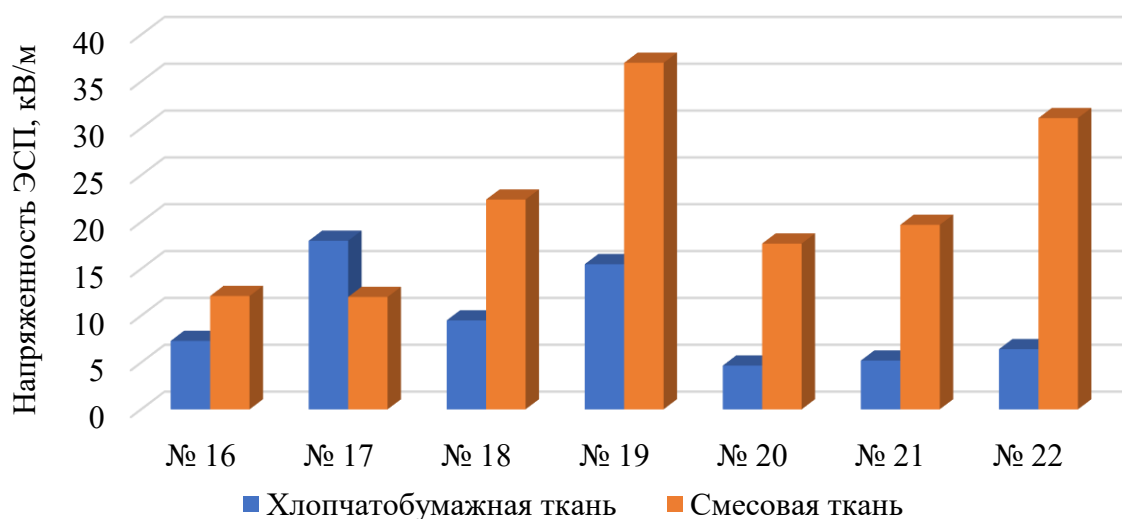


Рис. 2.10. Распределение равновесных значений напряженности ЭСП образцов войлоков для двух материалов контактной пары [114]

Сводные результаты оценки трибоэлектрических свойств образцов войлоков представлены в табл. В3, Приложение В. Анализ табличных данных позволяет сказать, что более безопасно использовать войлочную обувь с хлопчатобумажными носочно-чулочными изделиями. Но особенности структуры войлока по сравнению со структурами натуральных, искусственных и синтетических кож, затрудняют как оценку влияния толщины, поверхностной плотности на его трибоэлектрические показатели, так и возможность прогнозирования поведения этого материала в конструкции обуви. Поэтому для успешного применения войлоков в производстве обуви необходимо более детальное исследование их трибоэлектрических свойств с учетом всех факторов, влияющих на их характеристики. Это поможет получить надежные прогнозы и обеспечит оптимизацию не только проектирования, но и конструкции из данного материала в целом.

2.3.2. Исследования электростатических свойств материалов внутренних деталей верха обуви

Для исследования электростатических свойств материалов внутренних деталей верха обуви нами выбраны образцы натурального [114, 153, 205] и

искусственного меха, текстильных материалов, характеристики которых представлены в табл. Б4-Б6, Приложение Б.

Равновесные уровни напряженности ЭСП натурального меха показаны на рис. 2.11 [114]. Установлено, что уровень напряженности ЭСП натурального меха практически в 10 раз превышает пороговое значение. Испытания проводились без приложения давления, т.к. мощности привода контактной пары установки недостаточно для преодоления сопротивления ворса натурального меха.

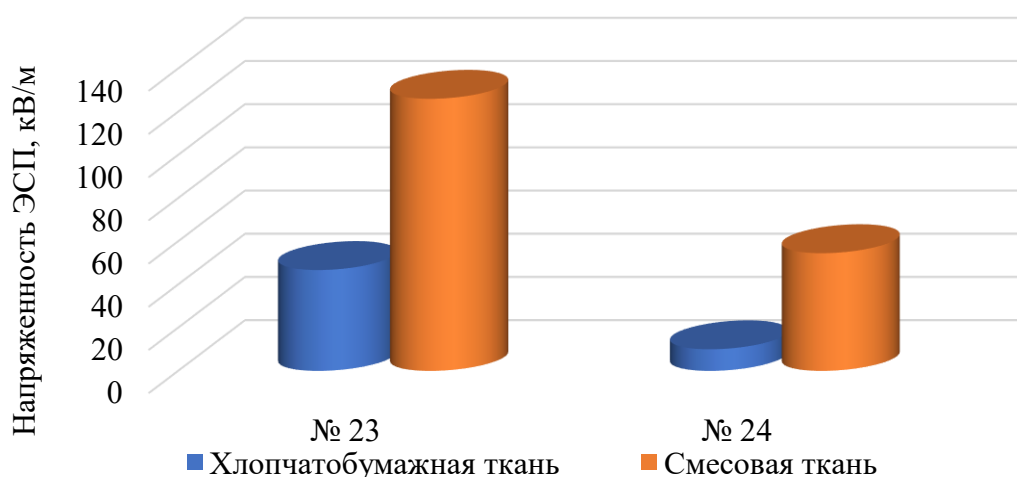


Рис. 2.11. Распределение равновесных значений напряженности ЭСП образцов натурального меха для двух материалов контактной пары [114]

Все полученные экспериментальным путем и рассчитанные на их основе показатели приведены в табл. В4, Приложение В.

Данные испытаний на электризуемость искусственного меха, представлены на рис. 2.12.

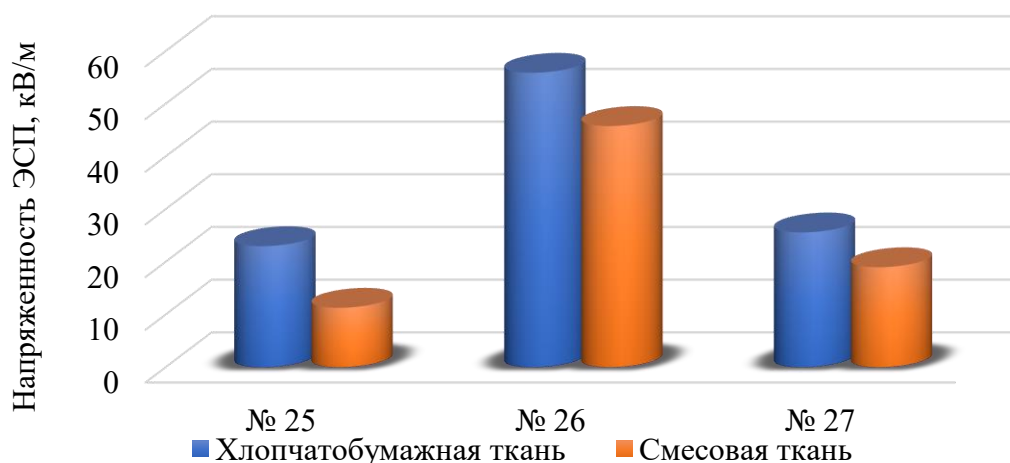


Рис. 2.12. Распределение равновесных значений напряженности ЭСП образцов искусственного меха для двух материалов контактной пары [114]

Очевидно, что напряженность ЭСП на поверхности всех образцов искусственно меха превышает значение пороговой напряженности ЭСП – 15 кВ/м. Величина напряженности явно зависит от сырьевого состава искусственного меха и не зависит от толщины и поверхностной плотности [114]. При этом образцы накапливают больший заряд в паре с хлопчатобумажной тканью.

Полученные в ходе испытаний показатели напряженности ЭСП искусственного меха представлены в табл. В5, Приложение В. Распределение напряженности ЭСП текстильных подкладочных материалов в зависимости от материала контактной пары показано на рис. 2.13.

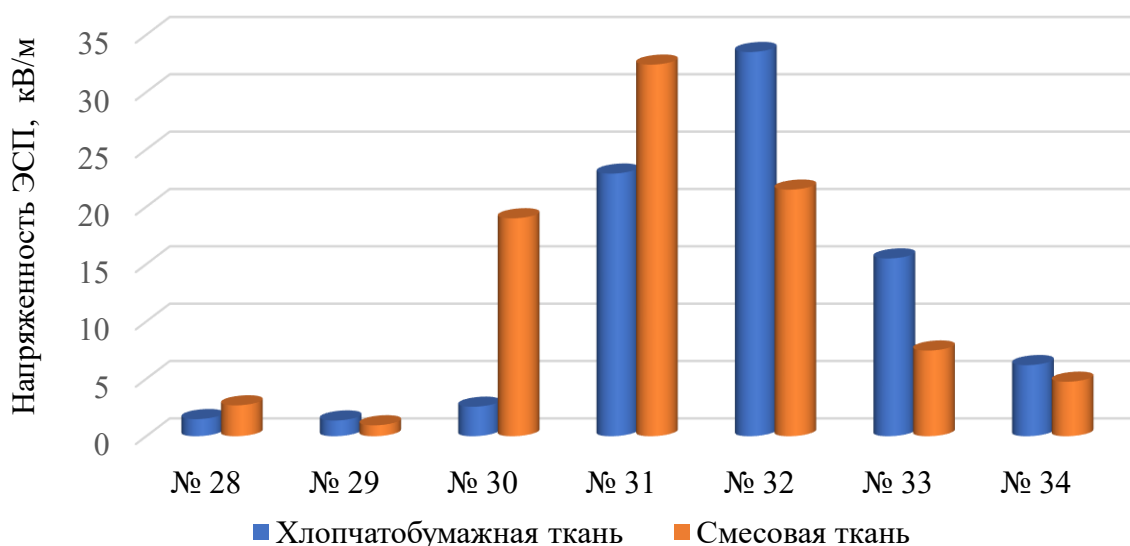


Рис. 2.13. Распределение равновесных значений напряженности ЭСП образцов текстильных подкладок для двух материалов контактной пары [114]

Напряженность ЭСП безусловно зависит от сырьевого состава образца. Образцы № 28 и 29 – это хлопковая и льняная ткани, диапазон напряженности ЭСП составляет 1-2 кВ/м, в то время как у синтетических материалов № 31 и 32 – в десятки раз больше.

Эти различия могут отразиться на состоянии пакетов заготовки верха обуви, так как высокие уровни электризации, характерные для синтетических материалов, будут способствовать накоплению электростатического заряда во внутриобувном пространстве.

В табл. В6, Приложение В представлены трибоэлектрические характеристики всех, принятых к исследованию текстильных материалов.

2.3.3. Исследования электростатических свойств материалов промежуточных деталей верха обуви

Для исследования электростатических свойств материалов промежуточных деталей верха обуви методом динамической электризуемости нами испытаны образцы 4-х мембранных материалов (табл. Б7, Приложение Б) при натирании их хлопковой и смесовой тканями [363].

Исследования показали (рис. 2.14), что при нормальных климатических условиях трибоэлектрические характеристики мембранных материалов очень малы: наименьший показатель напряженности ЭСП зафиксирован на образцах материала № 37 – 0,038 кВ/м, а наибольший № 36 – 0,601 кВ/м, что существенно меньше 15 кВ/м – допустимого уровня напряженности электростатического поля, регламентируемого российскими стандартами [21-23].

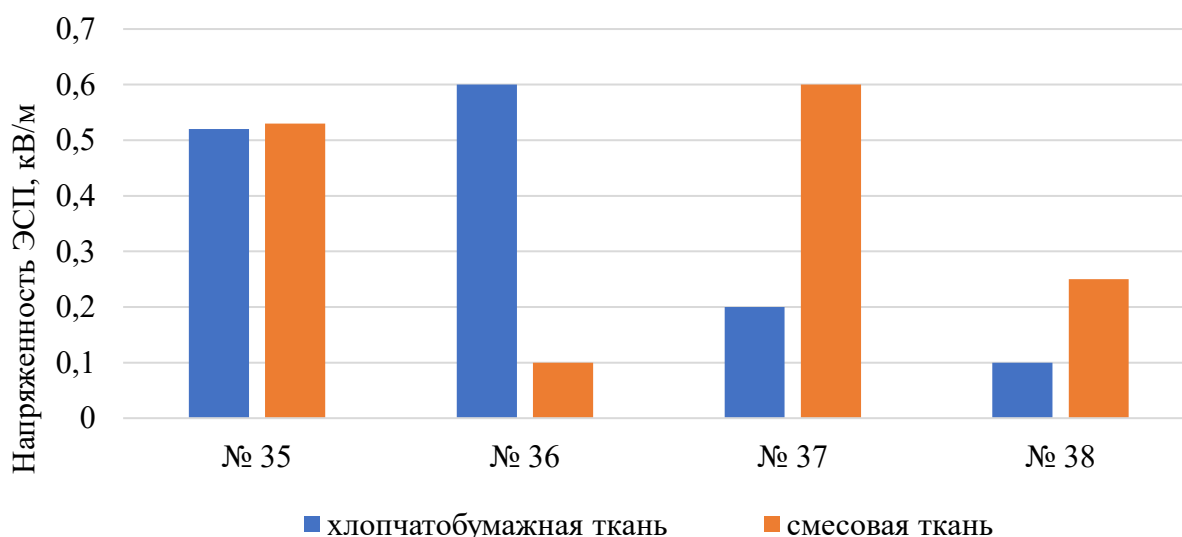


Рис. 2.14. Распределение равновесных значений напряженности ЭСП образцов мембранных материалов для двух материалов контактной пары

В табл. В7, Приложение В представлены трибоэлектрические характеристики всех, принятых к исследованию мембранных материалов

Ни на одном из образцов значения напряженности при натирании хлопком и смесовой тканью не превысили предельно допустимых. С точки зрения ЭСБ и комфорта мы можем использовать все 4 мембранных материала для промежуточных деталей специальной обуви.

2.3.4. Исследования электростатических свойств материалов внутренних деталей низа

После изучения и проведения испытаний материалов, используемых для верха обуви, важно обратить внимание на функциональные характеристики и свойства материалов, применяемых для деталей низа обуви [114].

Электростатические свойства материалов внутренних деталей низа обуви исследованы нами на восьми образцах (табл. Б8, Приложение Б) натуральной кожи, стелечных материалов торговых марок Drysole и Arneflex, вспененного полиуретана (ПУ) [362].

На контактной паре 5 – металлической пластинке прибора закреплялись различного состава образцы-имитаторы носочно-чулочных изделий:

- 1 – 100% х/б трикотаж;
- 2 – синтетический трикотаж, в состав которого входит 80 % х/б, 15 % полиэстера и 5 % эластана;
- 3 – бамбуковый трикотаж, содержащий 85% бамбукового волокна, 10 % полиамида и 5 % лайкры.

На поверхности образца № 39 – вспененного материала на основе латекса при взаимодействии со 100% х/б трикотажем максимальное значение напряженности ЭСП было достигнуто на 4 минуте и составило 10,7 кВ/м (рис. 2.15). За это же время (4 мин) при взаимодействии с синтетическим трикотажем максимальный ее показатель составил 15 кВ/м, а с бамбуковым 14 кВ/м. По истечении 15 минут напряженность ЭСП перестала расти, следовательно, наступило насыщение электростатическими зарядами, после чего отслеживали динамику стекания заряда с поверхности наэлектризованного материала.

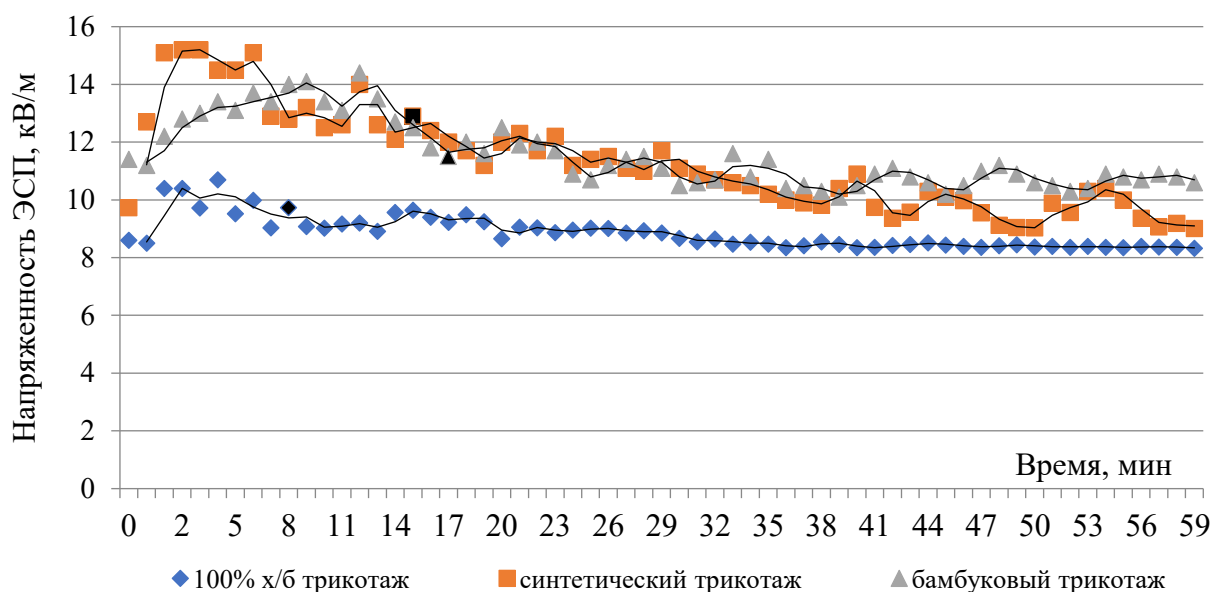


Рис. 2.15. Изменение напряженности ЭСП образца № 39 в зависимости от времени для различных типов трикотажа

Образец № 40 из того же материала (вспененный материал на основе латекса), что и образец № 39, но меньшей толщины показал схожие результаты: наименьшие показатели 11,4 кВ/м со 100% х/б трикотажем, а наибольшие (16,2 кВ/м) - с синтетическим.

При испытании образца № 41 - подкладочная кожа толщиной 0,6 мм (рис. 2.16) минимальные значения напряженности ЭСП получены со 100% х/б трикотажем и не превышают 6 кВ/м. Значения напряженности ЭСП с синтетическим трикотажем колеблются в диапазоне от 12 до 14 кВ/м, а бамбуковый трикотаж дает значения от 10 до 12 кВ/м. Высокие показатели напряженности ЭСП при контактах с синтетическим и бамбуковым трикотажем предположительно могут быть обусловлены анилиновым покрытием натуральной кожи. Образец № 42 – стелечный материал торговой марки Drysole – инновационный материал класса полупроницаемых мембран, изготовлен из волокон, которые обладают высоким водопоглощением и хорошей скоростью высыхания.

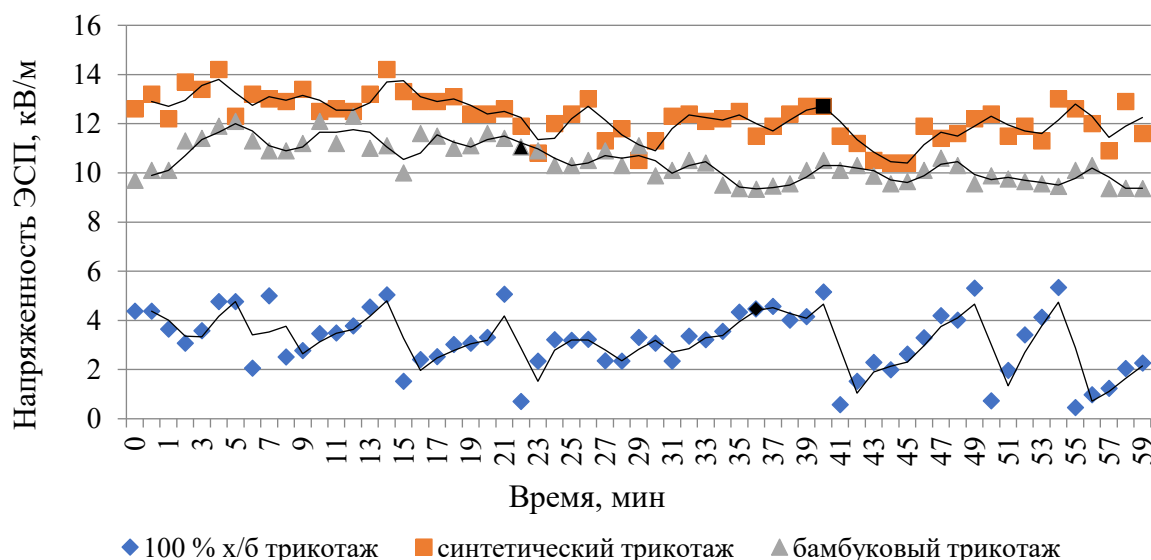


Рис. 2.16. Изменение напряженности ЭСП образца № 41 в зависимости от времени для различных типов трикотажа

Состав материала позволяет достичь идеального контроля влажности внутриобувного пространства. Повышенную мягкость, и как следствие, комфорт придает входящий в состав материала латекс.

Испытания образцов мембраны Drysole (рис. 2.17) показали, что при взаимодействии со 100% х/б трикотажем значения напряженности ЭСП не превышают 3 кВ/м; с бамбуковым трикотажем она достигает 20 кВ/м и превышает нормативные значения [23].

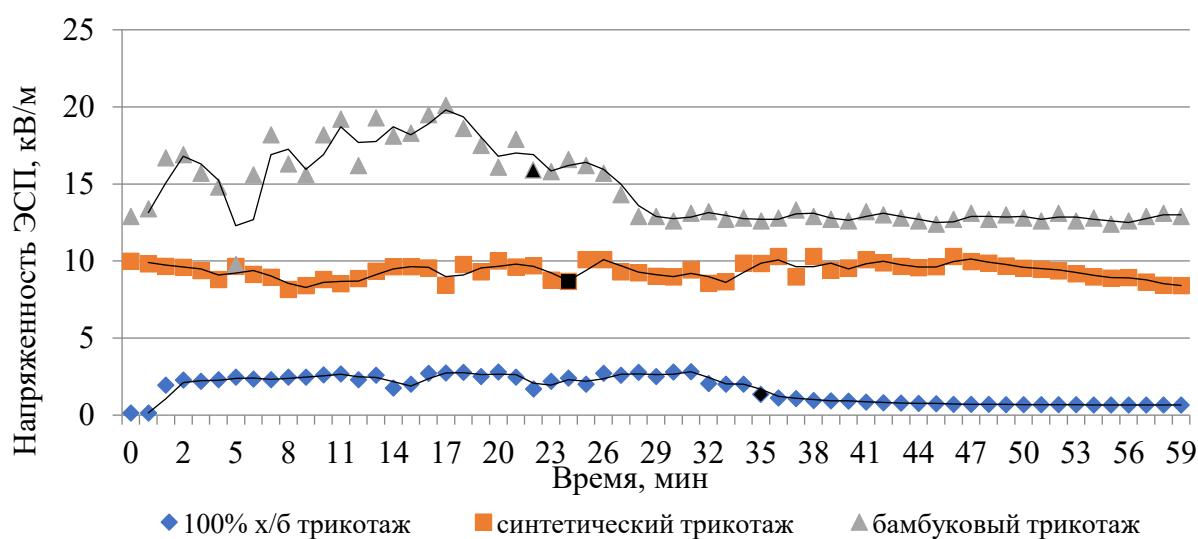


Рис. 2.17. Изменение напряженности ЭСП образца № 42 в зависимости от времени для различных типов трикотажа

При контакте же с синтетическим трикотажем значения показателя составили около 10 кВ/м. Образцы № 43 и 44 – из материалов торговой марки Arneflex (толщина 4,0 мм и 3,0 мм соответственно), высокой прочности и хорошей воздухопроницаемости с антибактериальным компонентом

Особенности материала Arneflex – ячеистая структура, 100% дышащий, обладает десорбцией, терморегулирующий, моющийся, легкий и экологичный. У образца № 43 при взаимодействии со 100% х/б трикотажем значения напряженности ЭСП находятся в диапазоне от 8 до 12 кВ/м (рис. 2.18).

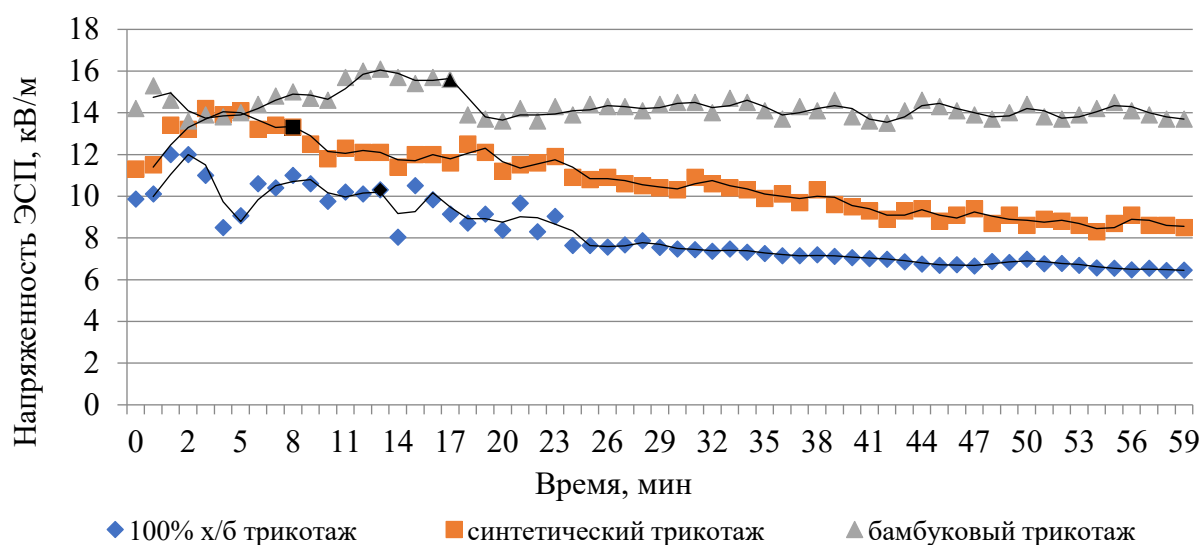


Рис. 2.18. Изменение напряженности ЭСП образца № 43 в зависимости от времени для различных типов трикотажа

Максимальные значения зафиксированы при взаимодействии с бамбуковым трикотажем – 16,1 кВ/м, в среднем значения напряженности ЭСП колеблются в диапазоне от 14 до 15 кВ/м. При взаимодействии с синтетическим трикотажем значения напряженности ЭСП находятся в интервале от 11 до 14 кВ/м.

У такого же по составу образца № 44 (торговая марка Arneflex), но толщиной 3,0 мм – наблюдается такая же картина, со 100% х/б трикотажем значения напряженности ЭСП находятся в диапазоне от 8 до 12 кВ/м. Максимальные значения зафиксированы при взаимодействии с бамбуковым трикотажем – 16,4 кВ/м, в среднем значения напряженности ЭСП колеблются в диапазоне от 14 до 16

кВ/м. При взаимодействии с синтетическим трикотажем значения напряженности ЭСП находятся в интервале от 11 до 14 кВ/м.

Образец № 45 - нетканый материал из ПЭ, толщиной 3,6 мм. Стельки из такого материала обладают высокими показателями воздухопроницаемости, износостойкости и прочности. Образец № 45 при взаимодействии с бамбуковым трикотажем за 9 минут набирает значение 50 кВ/м (рис. 2.19).

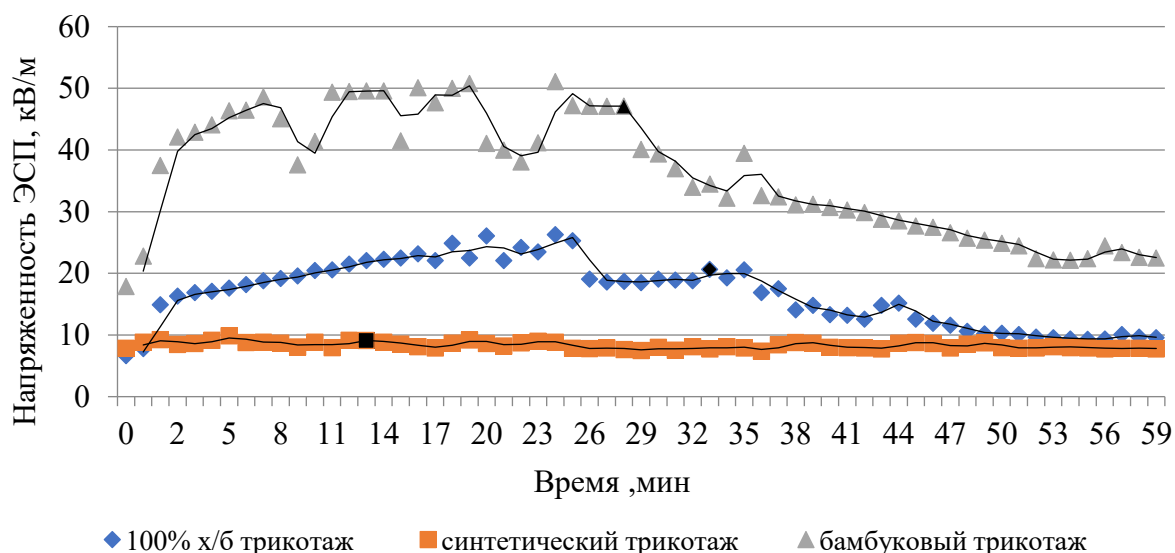


Рис. 2.19. Изменение напряженности ЭСП образца № 45 в зависимости от времени для различных типов трикотажа

При взаимодействии с синтетическим трикотажем значения напряженности ЭСП находятся в интервале от 8 до 10 кВ/м. При взаимодействии со 100% х/б трикотажем максимальные напряженности ЭСП достигается на 23 минуте и составляет около 25 кВ/м.

Образец № 46 – тканый материал хлопкового состава на клеевой основе может использоваться, как один из слоев вкладной стельки. В эксперименте с образцом № 46 наблюдаются практически одинаковые значения напряженности ЭСП при контакте со всеми материалами образцов-имитаторов носочно-чулочных изделий - от 12 до 16 кВ/м (рис. 2.20).

Таким образом, превышение пороговой величины 15 кВ/м [23], выявлено у образцов № 40, 42-46 (рис. 2.21). При этом у образца № 45 значения напряженности ЭСП превышают допустимые более чем в 3 раза. У образца № 40 зафиксировано

превышение пороговой величины с контактной парой синтетический трикотаж, у образцов № 43 и 44 с бамбуковым трикотажем на 5-10 %.

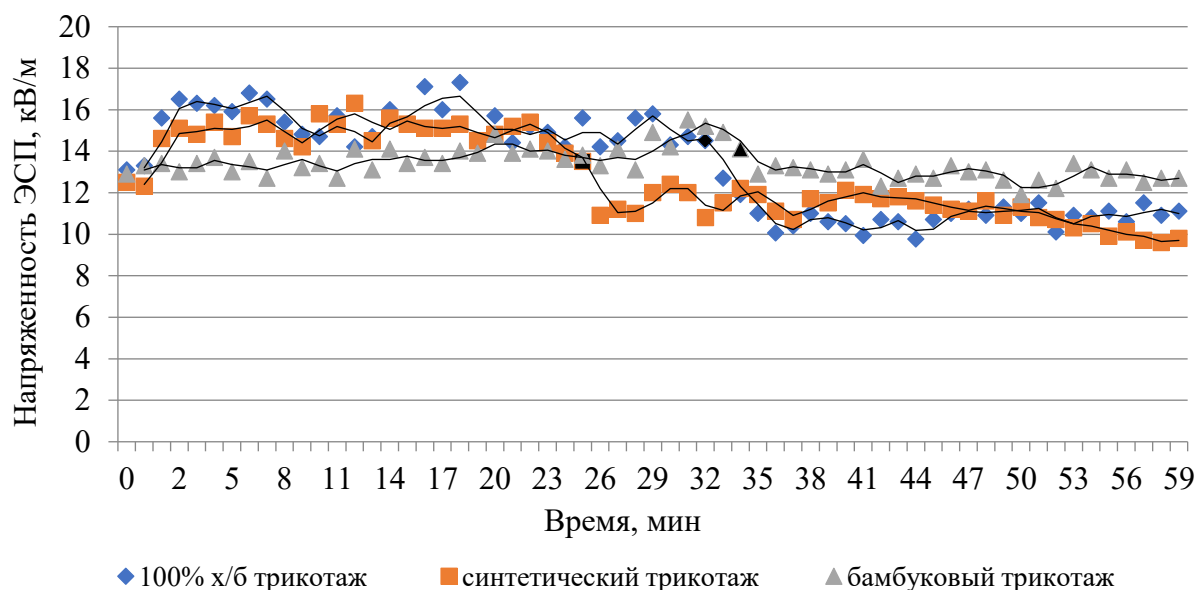


Рис. 2.20. Изменение напряженности ЭСП образца № 46 в зависимости от времени для различных типов трикотажа

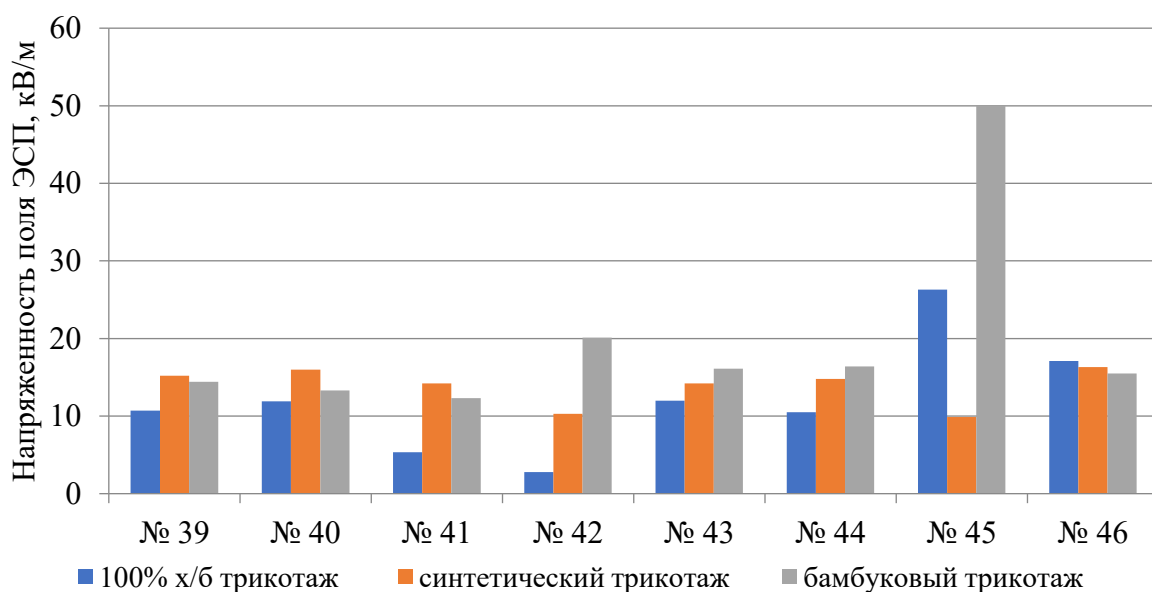


Рис. 2.21. Распределение максимальных значений напряженности ЭСП испытанных образцов

У образца № 42 превышение на 25 % зафиксировано с контактной парой бамбуковый трикотаж.

Выявлено, что трибоэлектрические характеристики стелечных материалов различаются в зависимости от материалов контактных: минимальный показатель

напряженности ЭСП зафиксирован у материала Drysole (№ 42) при взаимодействии 100% х/б трикотажем, следовательно, комбинация этих материалов менее подвержена трибоэлектрическим эффектам. Максимальная напряженность ЭСП у материала № 45 (нетканый материал из полиэстера) при взаимодействии с бамбуковым трикотажем, это может быть результатом различных факторов, таких как разница в трибоэлектрических рядах материи, а также свойствах бамбукового трикотажа, которые могут дополнительно усиливать электроизоляционные или диэлектрические качества полиэстера. В табл. В8, Приложение В представлены трибоэлектрические характеристики принятых к испытаниям мембранных материалов.

Необходимо отметить, что у рассмотренных вспененных стелечных материалов значения напряженности ЭСП находятся на грани и в некоторых случаях превышают критические значения в 15 кВ/м. Это обстоятельство дает понимание, что вспененные стелечные материалы не рекомендуется использовать в конструкциях антистатической обуви. Дополнительно следует обратить внимание на то, что наблюдаемое практически полное отсутствие стекания заряда говорит о высокой изолирующей способности этих материалов и абсолютно не приемлемо в контексте ЭСБ обуви.

2.3.5. Исследования электростатических свойств материалов наружных деталей низа

Для исследования электростатических свойств материалов наружных деталей низа обуви [30, 364] нами изготовлены образцы из кожволон, резины микропористой и резины монолитной. Другие материалы низа обуви, такие как полиуретан и термополиуретан не были предусмотрены для испытаний, поскольку они доступны в формах, отличных от листов, что затрудняет их использование в данной исследовательской работе. Показатели электризуемости образцов материалов наружных деталей низа обуви получены при трении по опорным

поверхностям, покрытым асфальтом, керамической плиткой, стальным листом и линолеумом (рис. 2.22- 2.24).

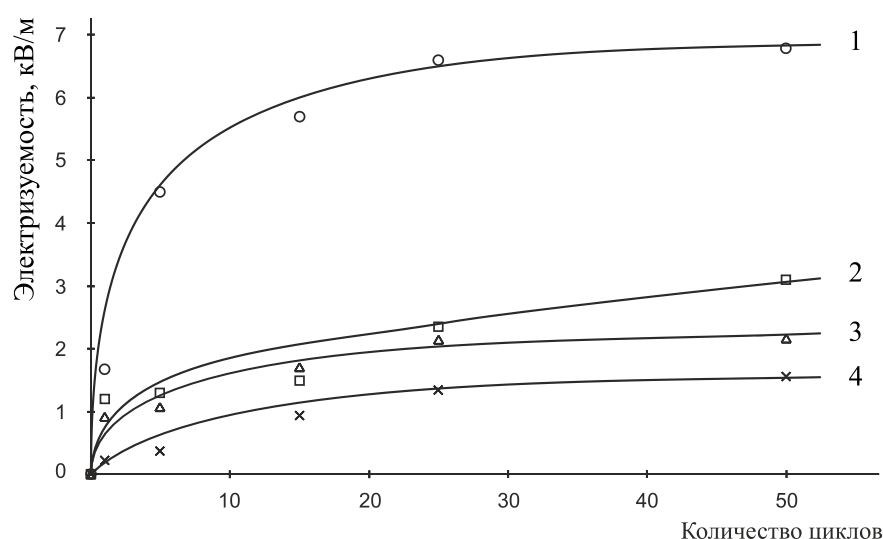


Рис. 2.22. Динамика электризации кожволоната по опорным поверхностям: 1 – линолеум, 2 – асфальт, 3 - керамическая плитка, 4 - стальной лист

Уровень электризации кожволоната зависит от покрытия опорных поверхностей. Так, при движении по стальному листу значение электризации составляет 0,2 кВ/м, а по линолеуму – 1,7 кВ/м, то есть возрастает в 8,5 раз. Изменение электризации подошвенного материала носит неравномерный характер. После 50 циклов движения электризация уменьшается и максимальное ее значение превышает минимальное в 4,3 раза. Для всех исследованных опорных поверхностей, кроме асфальтового покрытия, после 25-го цикла движения наблюдается выход кривой изменения электризации на равновесное состояние.

Электризация монолитной резины протекает идентично электризации кожволоната. Различие заключается только в численных значениях: после первого цикла движения максимальное значение электризации превышает минимальное в 5 раз, а после 50-ти циклов – в 7,5 раз. Все кривые изменения электризации выходят на равновесное состояние к 25-ти циклам движения.

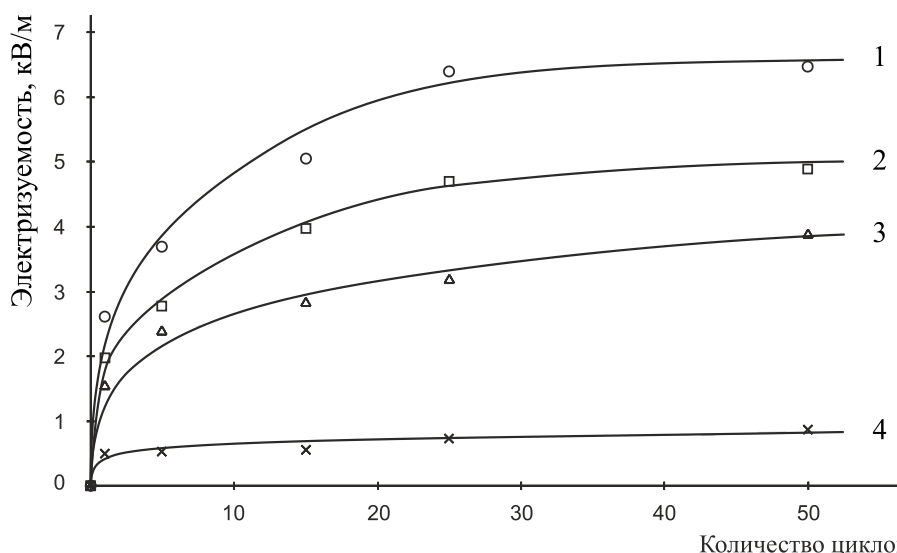


Рис. 2.23. Динамика электризации монолитной резины по опорным поверхностям: 1 – линолеум, 2 – керамическая плитка, 3 – асфальт, 4 – стальной лист

Характер электризации микропористой резины протекает аналогично электризации кожволлона и монолитной резины.

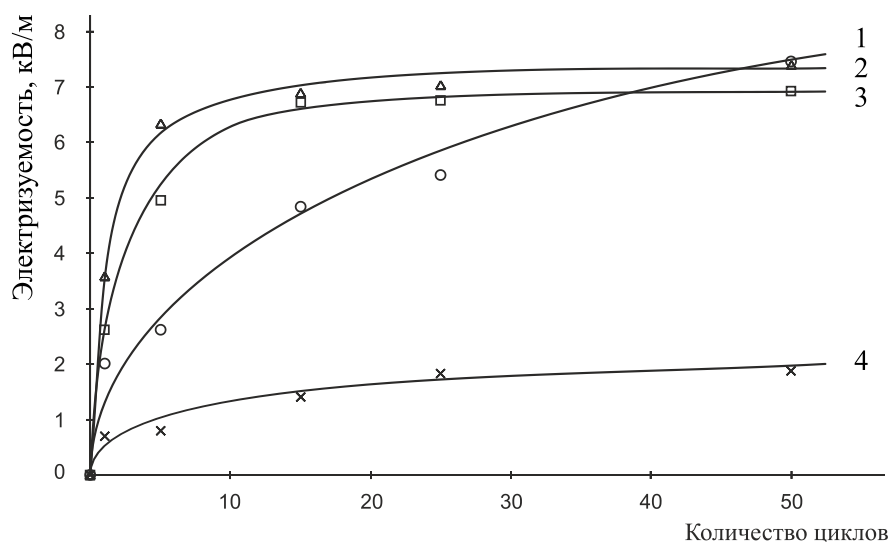


Рис. 2.24. Динамика электризации микропористой резины по опорным поверхностям: 1 – линолеум, 2 – асфальт, 3 – керамическая плитка, 4 – стальной лист

После первого цикла движения максимальное значение электризации превышает минимальное в 5 раз, а после 50-ти циклов – в 4 раза. Отличие заключается в поведении кривых электризации после 50-ти циклов движения по опорной поверхности «асфальт»: кривая роста электризации выходит на равновесное состояние, а на опорной поверхности «линолеум» напряженность

ЭПС возрастает. Объяснение этому явлению требует проведения дополнительных исследований.

Полученные экспериментальные результаты электризуемости подошвенных материалов хорошо согласуются с результатами исследований В.Я. Морякова и Н.З. Майоровой [371].

Характер электризуемости подошвенных материалов на основе резин одинаков. Отмечаемое возрастание электрического заряда до определённого значения обусловлено структурой и составом подошвенного материала, а также природой опорной поверхности. Распределения максимальных значений электризации исследуемых материалов после 50 циклов движения приведены на рис. 2.25.

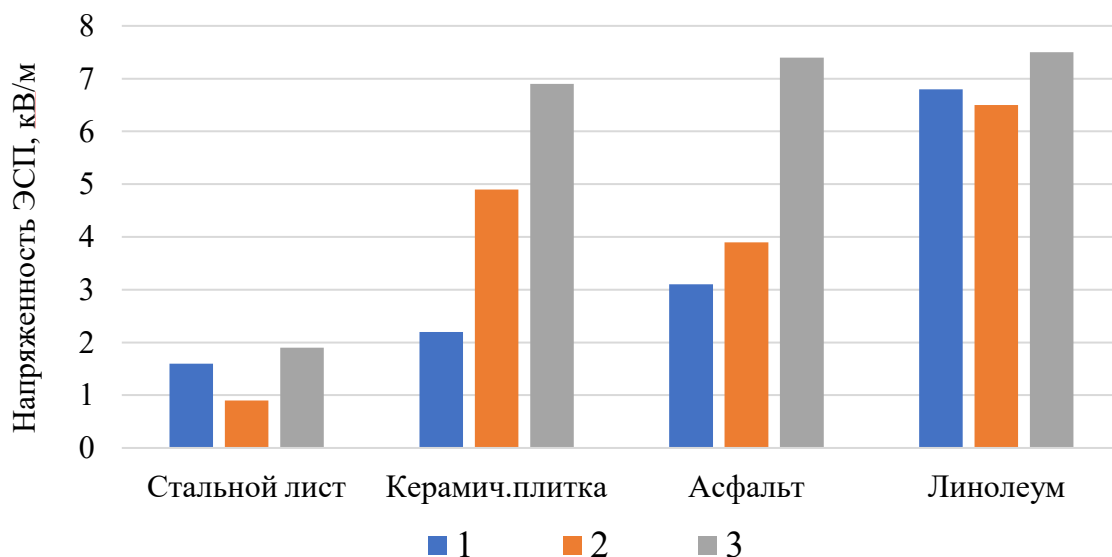


Рис. 2.25. Распределения максимальных значений электризации подошвенных материалов по опорным поверхностям: 1 – кожволон, 2 – монолитная резина, 3 – микропористая резина

Максимальные значения электризации исследованных материалов имеют разные значения, зависящие от состава материала, его структуры, электрических характеристик опорных поверхностей, но не превышают 8 кВ/м, что в 2 раза ниже критических значений в 15 кВ/м.

Электризуемость подошвенных материалов по стальному листу имеет наименьшее значение из всех исследованных опорных поверхностей. Это можно объяснить, используя трибоэлектрические шкалы (см. рис. 2.2). Сталь, благодаря

высокой электропроводности, обладает нейтральным зарядом. Образующиеся при трении электрические заряды на материалах подошв, быстро стекают при контакте с нейтрально заряженной стальной поверхностью, поэтому максимальные значения электризуемости на стальном листе ниже, чем на асфальте, керамической плитке и линолеуме.

Микропористая резина показала более высокие значения напряженности, так как содержит поры или ячейки, что создает большое количество активных поверхностей, на которых могут накапливаться заряды.

Микропористая резина продемонстрировала более высокие значения напряженности электрического поля по сравнению с другими исследованными материалами. Это обусловлено её структурной особенностью – наличием пор или ячеек, которые значительно увеличивают количество активных поверхностей, на которых могут накапливаться заряды, что приводит к более выраженному трибоэлектрическому эффекту.

Показатели электризуемости обувных материалов исследовались в нормальных климатических условиях. Но следует учитывать, что факторы окружающей среды способны влиять на электростатические характеристики материалов [58]. Обувные конструкции применяются в реальных условиях, поэтому исследования только в лабораториях могут не отражать их поведение при эксплуатации. В свете вышеизложенного, очевидно, что изучение электризуемости материалов в разнообразных климатических условиях является важным и необходимым направлением исследований.

2.4. Разработка и реализация метода исследования электростатических свойств материалов в широком диапазоне температур

Поэтому принято решение о создании установки для изучения процессов накопления и спада зарядов на образцах материалов в широких климатических условиях [365]. Известно, что влияние климатических факторов способствует возникновению высокого уровня потенциала U_0 на теле человека за счет

накопления электростатического заряда от одежды и обуви при температуре ниже минус 20-25°C [365].

В условиях низких температур в атмосферном воздухе содержится малое количество водяного пара, поэтому наружная часть обуви заметно сильнее электризуется, чем ее части, прилегающие к стопе, где влажность существенно выше за счет теплового излучения кожи человека. В случае, если детали обуви выполнены из ткани с низкой электропроводностью, между наружными и внутренними деталями обуви сопротивление утечке составляет более 10^9 Ом. В этих условиях скорость релаксации зарядов статического электричества на поверхности обуви снижается в 50 – 100 раз. Соответственно повышается потенциал зарядов статического электричества на наружных деталях обуви по сравнению с внутренними [114].

Несмотря на то, что тонкий механизм генерации электростатических зарядов твердых тел на микроуровне теоретически изучен достаточно подробно, количественные характеристики процессов электризации конкретных сред и материалов для реальных условий могут быть установлены лишь на основе экспериментальных исследований [365]. Это объясняется тем, что поверхностные явления, определяющие интенсивность электризации, существенно зависят от неконтролируемых примесей и загрязнений как в объеме, как и на поверхностях сред и материалов, участвующих в процессе электризации [365].

Известны исследования электростатических свойств обувных материалов не только в нормальных климатических условиях, но и при пониженных и повышенных температурах. Однако, отсутствуют сведения об исследованиях электростатических свойств каких-либо материалов при отрицательных температурах.

При создании установки [365] для изучения процессов накопления и спада зарядов на образцах материалов одежды и обуви для типичных условий эксплуатации мы исходили из того, что она должна обеспечить:

- измерение таких основных трибоэлектрических характеристик, как величина заряда, скорость образования и релаксации заряда на поверхности, для

различных пар материалов;

- непрерывное накапливание заряда на образце за счет трения между поверхностями различных материалов;
- работоспособность всех ее блоков и датчика ЭСП в интервале температур от -50°C до $+60^{\circ}\text{C}$.

Наибольшее распространение получили датчики, в которых ЭСП у поверхности измерительной секции модулируется механическим перемещением измерительного зонда путем вращения или вибрации [8]. В разработанном нами датчике использован камертон, что исключает в конструкции типичные механические приводы (электромоторы, электромагниты), которые снижают надежность датчиков при низких температурах, а также существенно увеличивают их габаритные размеры. Конструкция разработанного датчика ЭСП представлена на рис. 2.26 [365].

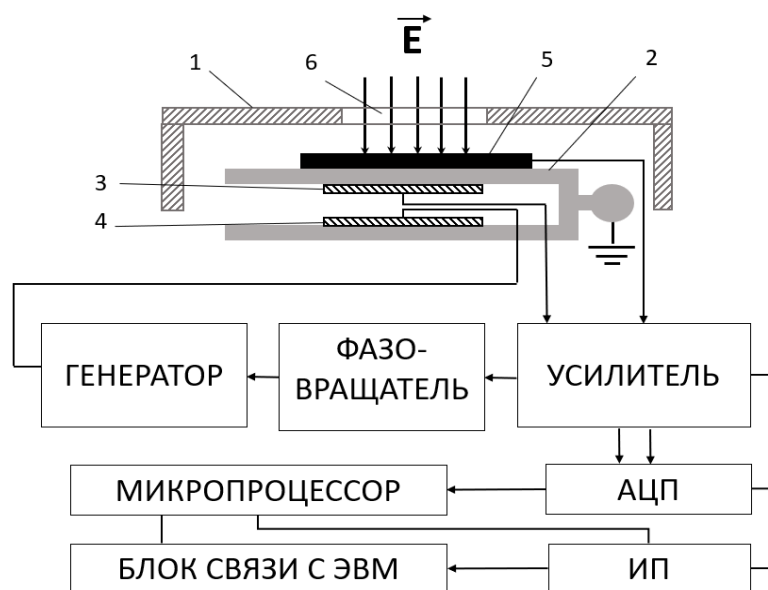


Рис. 2.26. Структура камертонного датчика ЭСП:

1 – корпус, 2 – камертон, 3, 4 – пьезоэлементы, 5 – зонд, 6 – входное окно

Колебательная система датчика представляет собой камертон 2, изготовленный из стали марки 36НХТЮ, модуль упругости которой слабо изменяется в широком диапазоне температур. Температурный коэффициент изменения частоты первой моды колебаний около 827 Гц не превышает значения $2 \cdot 10^{-6} \text{ 1/}^{\circ}\text{C}$ [366]. На ветвях камертона закреплены пьезоэлементы 3 и 4. Последний

выполняет функцию актюатора, и на его электроды подается электрический сигнал возбуждения колебаний заданной частоты и амплитуды. Сигнал, генерируемый пьезоэлементом 3 пропорционален величине его деформации, что позволяет использовать его для обратной связи и регистрации текущих значений амплитуды и фазы колебаний ветви камертона [365].

На внешней поверхности ветви камертона закреплен зонд 5 – полоска из диэлектрика с проводящим покрытием из золота. Наведенный на зонде заряд от ЭСП, преобразуется в электрический сигнал $U(t)$. Камертон работает в автоколебательном режиме и при больших значениях добротности колебательной системы амплитуда выходного сигнала прямо пропорциональна добротности, при этом выходная частота сигнала равна собственной частоте колебательной системы и не зависит от условий закрепления резонатора и наличия внешней вибрации [365].

Электрический сигнал, который снимается с зонда, в общем виде может быть представлен суммой:

$$U(t) = A \sin(\omega t) + P(t), \quad (2.19)$$

где A – амплитуда полезного сигнала;

ω – угловая частота полезного сигнала, которая соответствует частоте колебаний камертона;

t – время, в течение которого наблюдается изменение электрического сигнала;

$P(t)$ – сигнал ошибки или помехи.

Сигнал является гармоническим и его частоту можно считать неизменной в течение нескольких периодов. Цифровой код амплитуды сигналов с зонда ЭСП и с установленного на камертоне пьезоэлемента 3, регистрируются 2-х канальным аналого-цифровым-преобразователем (АЦП) с частотой оцифровки, достаточной для корректной цифровой обработки ($\omega_1 > 2\omega$). Временная синхронизация и управление работой АЦП осуществляется микроконтроллером.

Регистрация и обработка данных, полученных с зонда ЭСП, основана на принципе взаимной корреляции с сигналом, который снимается с пьезоэлемента 3.

Цифровой алгоритм обработки периодических сигналов на фоне шумов с использованием корреляционно-спектрального анализа позволяет существенно снизить погрешности измерений датчика ЭСП [365, 367, 368].

Собственно установка, схема которой представлена на рис. 2.27 состоит из термоэлектрической камеры тепла-холода 1 на базе элементов Пельтье,

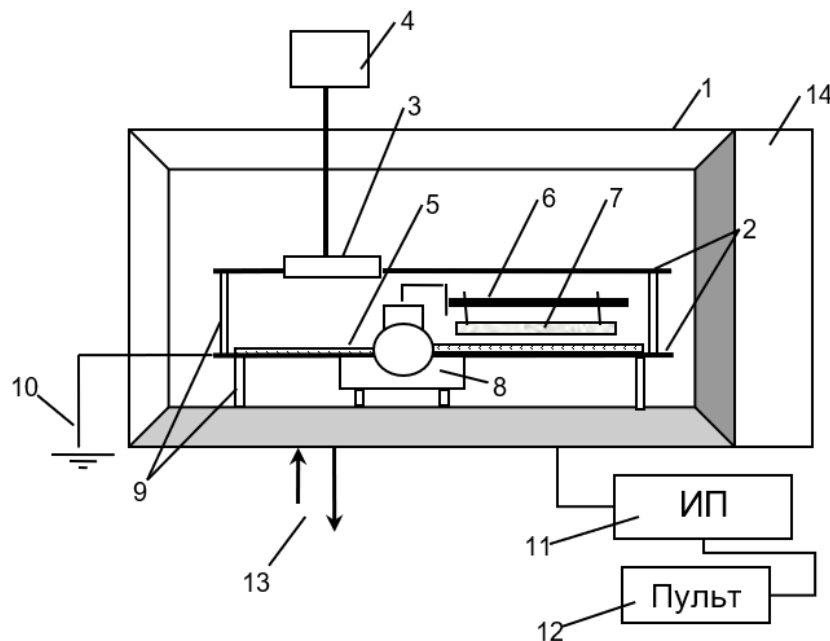


Рис. 2.27. Схема установки исследования трибоэлектрических свойств материалов одежды и обуви:

1 – термоэлектрическая камера тепла-холода на базе элементов Пельтье; 2 – пластины конденсатора; 3 – камертонный датчик ЭСП с платой генератора, усилителя и фазовращателя; 4 – считывающее устройство камертонного датчика; 5 – полка для испытуемого материала; 6 – планка для крепления контактной пары; 7 – контактная пара; 8 – электрический привод механизма контактной пары; 9 – стойки; 10 – провод заземления; 11 – источник питания; 12 – пульт управления механизмом контактной пары; 13 – контур водяного охлаждения; 14 – блок управления камерой тепла-холода

пластин 2 конденсатора, одна из которых заземлена; камертонного датчика электростатического поля с платой генератора, усилителя и фазовращателя 3; считывающего устройства 4 на базе микропроцессора, полки 5 для испытуемого материала, планки 6 для крепления контактной пары 7, электрического привода 8 - механизма контактной пары, стоек 9 из непроводящего материала, провода заземления 10, источника питания ИП 11, пульта управления 12 механизмом контактной пары, контура водяного охлаждения 13 и блока управления камерой

тепла-холода /4.

Рабочий объем камеры, выполненной из сплава алюминия толщиной стенок 8 мм для более равномерного распределения температуры на внутренней поверхности, располагается в корпусе, который защищен теплоизолирующим слоем. Камертонный датчик ЭСП размещен на верхней пластине конденсатора таким образом, что на поверхность зонда (см. рис. 2.26) через отверстие в пластине воздействует ЭСП, возникающее от электризации образца на полке 5, при движении контактной пары [365].

Основные технические характеристики установки приведены в табл. 2.9.

Табл. 2.9. Характеристики установки для исследования трибоэлектрических свойств материалов в широком диапазоне температур [365]

Характеристика	Значение
1.Размер испытуемого образца, мм	200 x 150
2.Размеры контактной пары, мм	100 x 10
3. Интервал рабочих температур, °С	- 50 ... + 60
4.Расстояние между пластинами конденсатора, мм	50
5. Частота возвратно-поступательных движений контактной пары, циклов/с	0,5
6. Диапазон измерения напряженности ЭСП, кВ/м	0,05 – 300
7. Пределы допускаемой основной относительной погрешности измерения напряженности ЭСП, %, не более	15
8. Точность поддержания заданной температуры, °С	± 0,4
9. Дискретность индикации температуры, °С	0,1
10. Дискретность установки температуры, °С	1
11. Потребляемая мощность, Вт, не более	800

Калибровочные измерения проводятся с помощью стабилизированного высоковольтного источника питания, позволяющего получать напряжение в диапазоне 0-20 кВ, которое подается на пластины конденсатора 2 (см. рис. 2.27). Типичные калибровочные кривые изменения выходного сигнала, полученные для различных рабочих температур в диапазоне от -50°С до +40°С, представлены на рис. 2.28 [365].

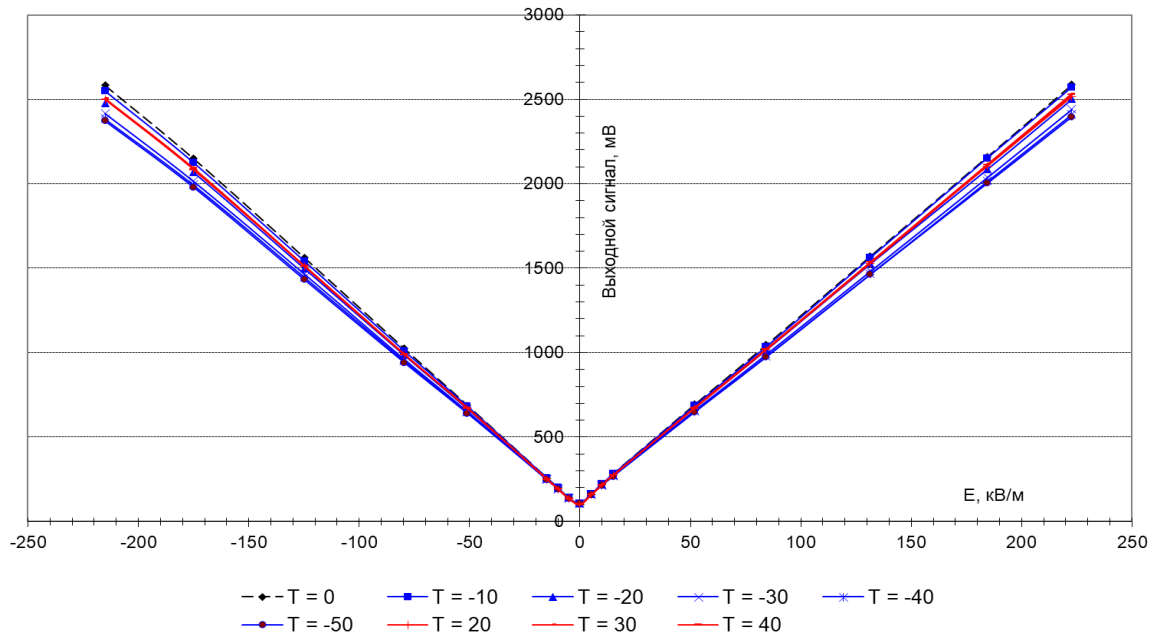


Рис. 2.28. Калибровочные графики температур в диапазоне от -50°C до $+40^{\circ}\text{C}$

Постоянную времени релаксации заряда τ , которая является важнейшей характеристикой, влияющей на трибоэлектрические свойства материалов, рассчитывали по формуле 2.16 ($\tau = (t_1 - t_2) / \ln(Q(t_1) / Q(t_2))$).

Минимальное время релаксации, которое можно измерить на установке (2 с) определяется количеством зафиксированных за время измерения точек при временном интервал между ними $6,7 \times 10^{-2}$ с (15 измерений за 1 с).

На рис. 2.29 приведены параметры напряженности ЭСП и постоянной времени релаксации на примере испытаний натуральной кожи - юфти.

Разработанная установка позволяет исследовать трибоэлектрические свойства различных натуральных и синтетических материалов в диапазоне температур (от -50°C до $+60^{\circ}\text{C}$) и использовать полученные данные при проектировании утепленной обуви для персонала, работа которого проходит в условиях Крайнего Севера в нефтегазовой отрасли, в химическом производстве, при перевозке горючих и взрывоопасных веществ железнодорожным и морским транспортом [365]. Предложенный вариант камертонного датчика ЭСП, а также современные цифровые методы обработки сигналов могут стать основой создания измерительных систем регистрации опасных уровней ЭСП.

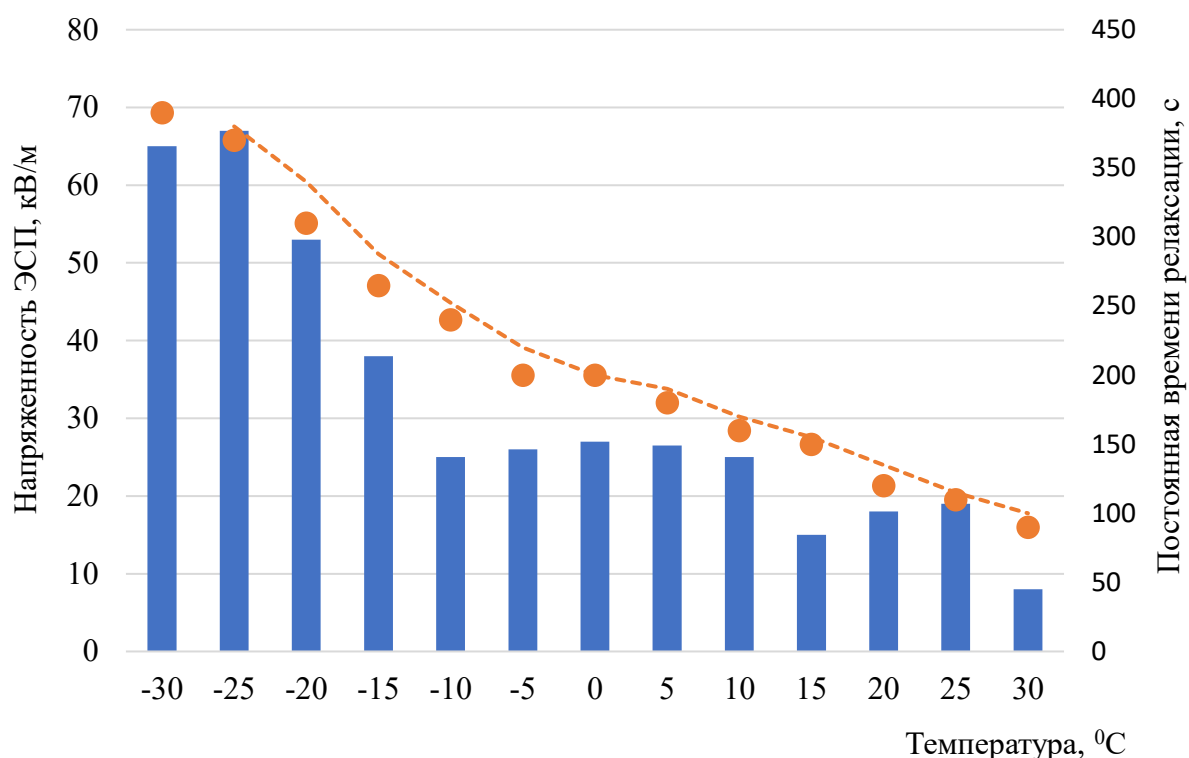


Рис. 2.29. Распределение постоянной времени релаксации и напряженности ЭСП юфти в диапазоне температур от -30°C до +30°C

На основании результатов динамических исследований напряженности ЭСП в климатической камере на примере полиамидного материала, испытываемый образец натирался смесовой тканью (хлопок - 30%, ПАН - 25%, ПА - 45%) [370]. Можно констатировать, что при снижении температуры, постоянная времени релаксации материала значительно увеличивается. Это свидетельствует о том, что температура является важным фактором, влияющим на трибоэлектрические свойства обувных материалов. Из табл. 2.10 видно, что значения постоянной времени релаксации полиамидного материала очень велики и, следовательно, он не подходит для специальной обуви.

Табл. 2.10. Постоянная времени релаксации полиамидного материала [370]

Температурный режим	Постоянная времени релаксации, τ , мин
0 °C	271
- 10 °C	292
- 20 °C	168
- 30 °C	1250
- 40 °C	1600
- 50 °C	3333

На скорость стекания зарядов на полимерах различного строения различное влияние оказывает влажность воздуха. Наряду с этим многие материалы демонстрируют различные скорости утечки положительных и отрицательных зарядов, что указывает на неоднозначность механизма стекания заряда только за счет электропроводности, зависящей от электрического сопротивления образца.

Приведенный пример свидетельствует о необходимости исследования электрических свойств обувных материалов при пониженных температурах. Для испытаний в камере тепла-холода ТЭК 50/60 нами выбраны материалы № 47-51, характеристики которых представлены в табл. Б9, Приложение Б. В качестве материала контактной пары использовалась 100% х/б ткань [372]. Испытания проводились в диапазоне температур от -30°C до $+30^{\circ}\text{C}$, при относительной влажности в воздухе $65 \pm 5\%$ и погрешности измерения 15%. На рис. 2.30 представлены результаты лабораторных исследований материала № 47 - юфть для верха обуви. Из рисунка видно, что с понижением температуры от $+10^{\circ}\text{C}$ возрастают значения электростатического заряда. Четко прослеживается три температурных интервала. В интервале от $+15$ до $+30^{\circ}\text{C}$ заряд находится на уровне 10 кВ/м.

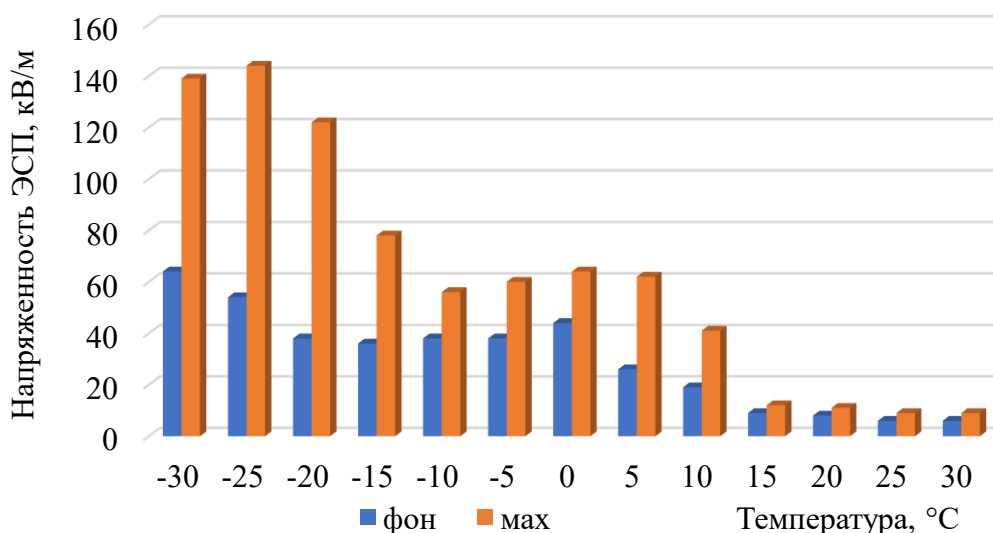


Рис. 2.30. Изменение напряженности ЭСП образца № 47 в диапазоне температур от -30°C до $+30^{\circ}\text{C}$

При понижении температуры с $+10$ до -10°C , напряженность ЭСП увеличивается и достигает 40-60 кВ/м. В интервале от -15 до -30°C напряженность

ЭСП достигает максимальной величины - 142 кВ/м. На рис. 2.31 представлены результаты лабораторных исследований материала № 48 - спилок яловый для деталей подкладки. В интервале температур от +15 до +30 °С напряженность ЭСП составляет около 10 кВ/м, с понижением температуры просматривается явное увеличение значений и при -30°С напряженность ЭСП равняется 121 кВ/м.

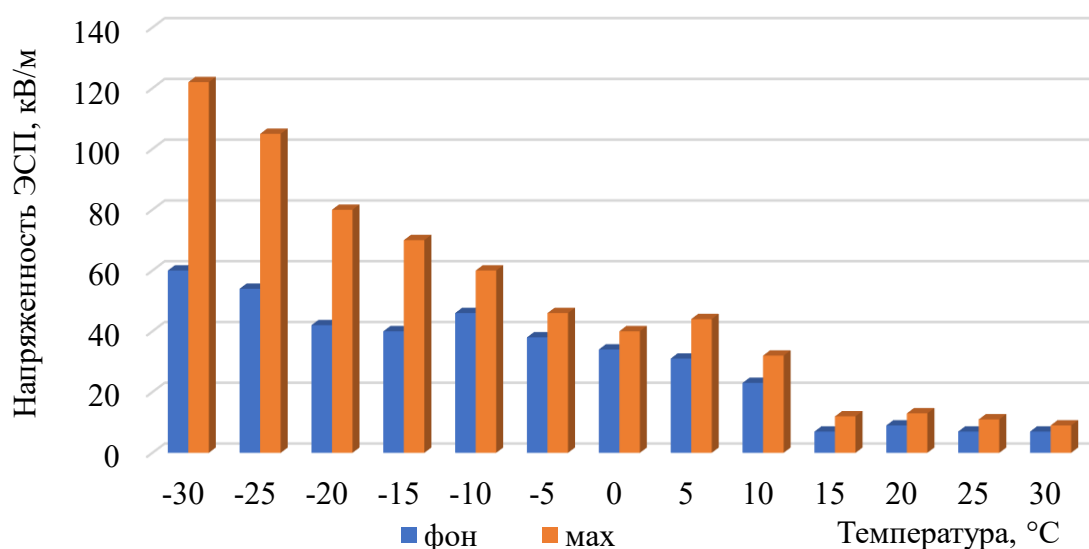


Рис. 2.31. Изменение напряженности ЭСП образца № 48 в диапазоне температур от -30°С до +30°С

Результаты лабораторных испытаний образцов нетканого подкладочного материала № 49 «Cambrelle» на поролоне (рис. 2.32) показывают, что при положительной температуре напряженность ЭСП составляет от 50 до 100 кВ/м, а с ее понижением значения возрастают и при -30°С достигают 300 кВ/м.

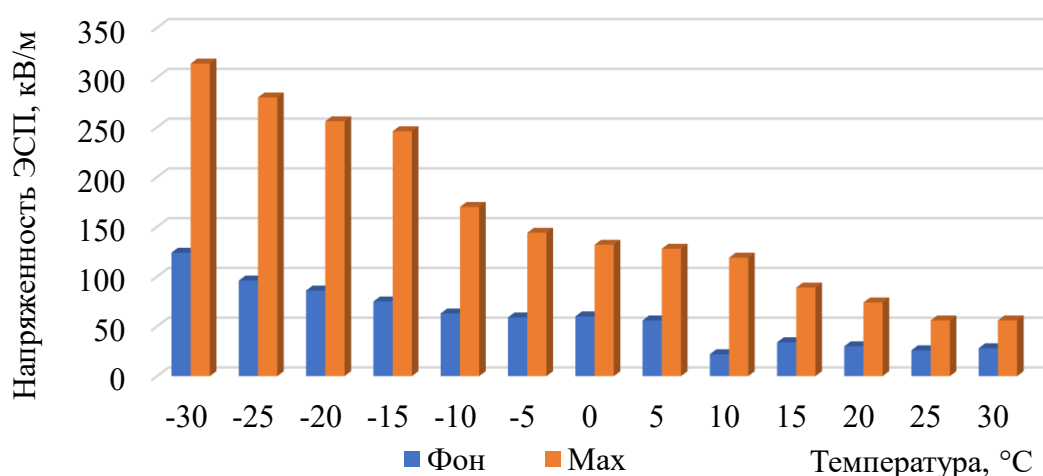


Рис. 2.32. Изменение напряженности ЭСП образца № 49 в диапазоне температур от -30°С до +30°С

Результаты лабораторных испытаний образцов материала № 50 для задников и подносков - нитроискожа-Т (рис. 2.33) показали, что в положительном интервале температур, напряженность ЭСП проявляется на уровне 5 кВ/м, при 5°C возрастает до 20 кВ/м, после чего идет постоянное ее увеличение и при -30 °C составляет уже 100 кВ/м.

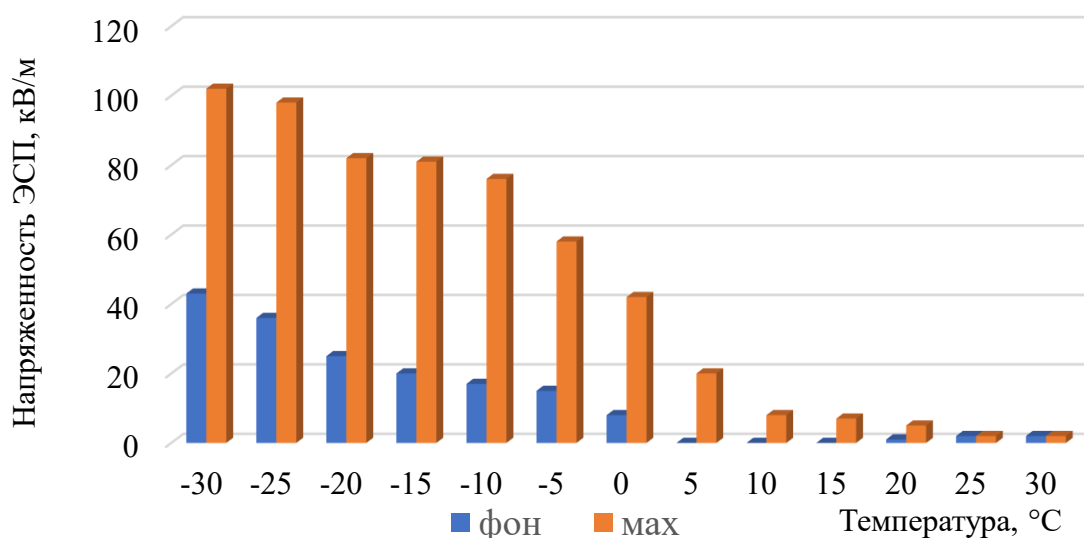


Рис. 2.33. Изменение напряженности ЭСП образца № 50 в диапазоне температур от -30°C до +30°C

Результаты лабораторных испытаний образцов материала № 51 - бязь термопластическая с клеевой пропиткой для межподкладки (рис. 2.34) показали, что в положительном интервале температур напряженность ЭСП составляет около 40 кВ/м, и ее увеличение происходит при -10°C.

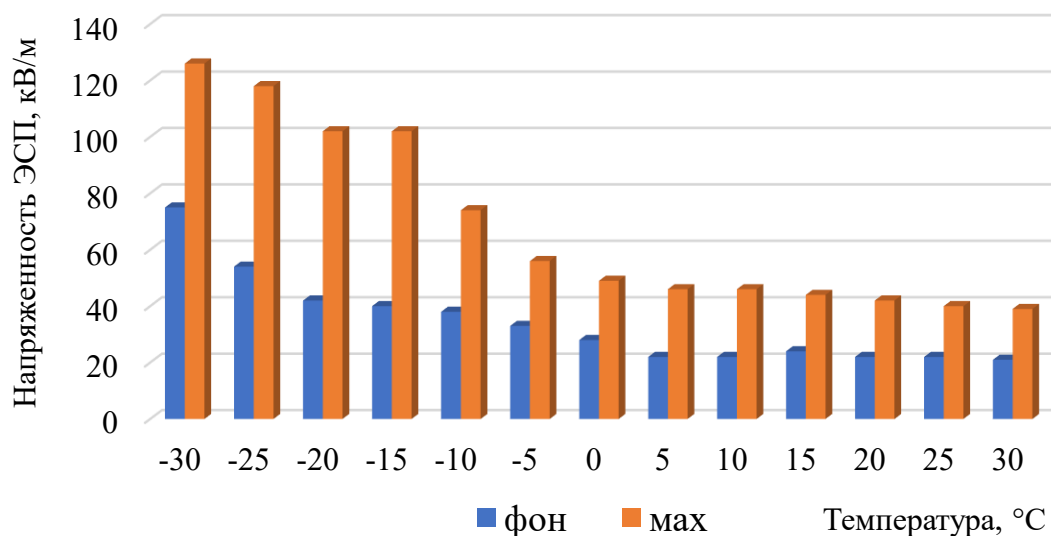


Рис. 2.34. Изменение напряженности ЭСП образца № 51 в диапазоне температур от -30°C до +30°C

На рис. 2.35 представлено изменение постоянной времени релаксации электростатического заряда всех испытанных материалов в диапазоне температур от -30°C до $+30^{\circ}\text{C}$.

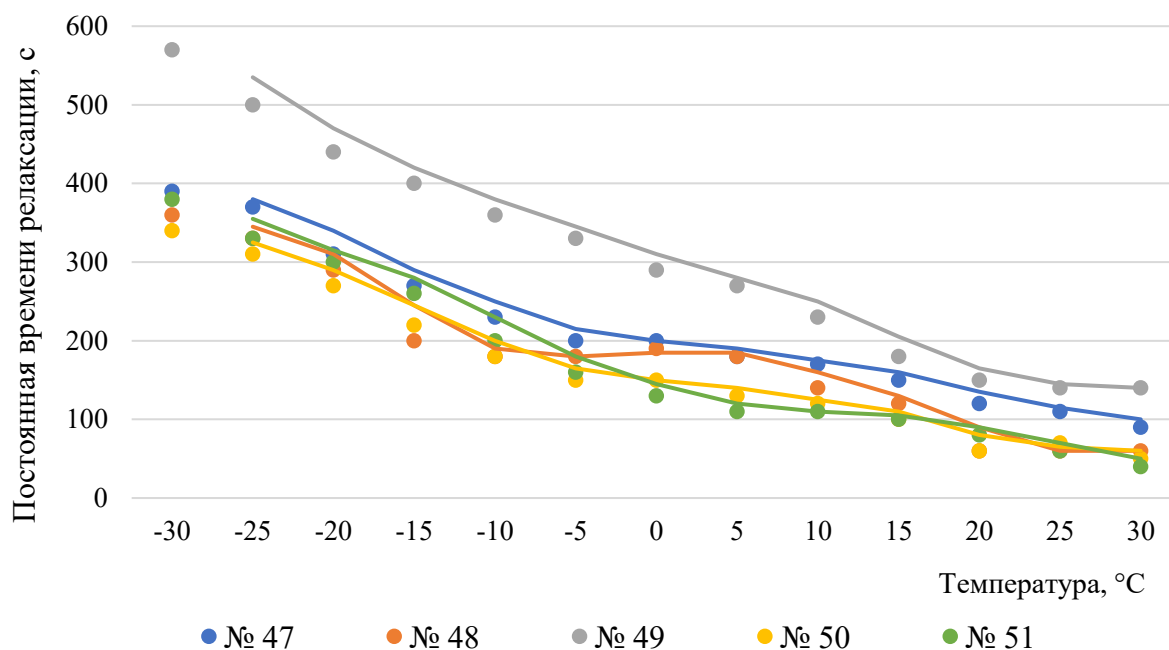


Рис. 2.35. Зависимость постоянной времени релаксации электростатического заряда от температуры

Во всех случаях прослеживается одинаковая динамика: с понижением температуры стекание электростатических зарядов замедляется. Самые высокие результаты – более 550 с - у образца № 49. Результаты испытаний наиболее часто применяемых обувных материалов наглядно продемонстрировали, что в условиях низких температур время релаксации зарядов статического электричества на поверхности материалов и напряженность ЭСП многократно увеличивается.

Проведенные эксперименты показали, что, по-видимому, на механизм накопления и релаксации трибоэлектрического заряда существенно влияет пленка влаги, которая всегда находится на поверхности гидрофобного материала. Электропроводность материалов в значительной степени определяется присутствием на их поверхности примесей, особенно электролитов (кислоты, щелочи, соли и т.д.) [58], являющихся источниками возникновения слабосвязанных или свободных ионов. Парциальное давление паров воды в атмосферном воздухе с

понижением температуры резко падает. Снижение температуры при испытаниях образцов приводит к удалению влаги из воздухопроницаемой толщины и, следовательно, приводит к снижению электропроводности и увеличению времени стекания заряда с поверхности [365].

По полученным данным построены зависимости постоянных времени стекания зарядов λ ($\lambda = \ln 2/\tau$) от температуры в координатах $1/T$ К (рис. 2.36).

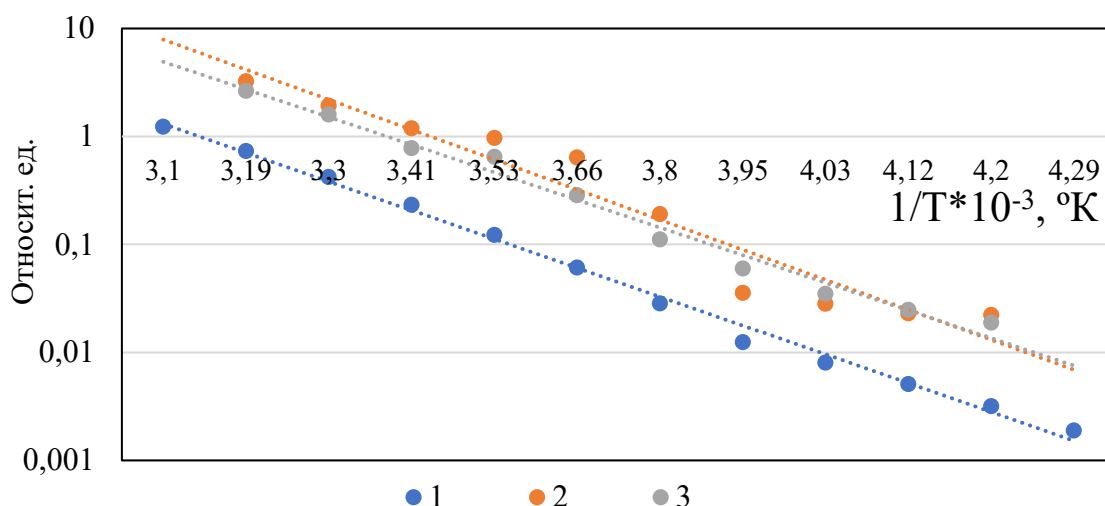


Рис. 2.36. Влияние температуры испытаний образцов на постоянную времени стекания зарядов λ (1 – значения давления насыщенного пара над плоской поверхностью воды, Па; 2 – λ_i для образца № 47, c^{-1} ; 3 – λ_i для образца № 49, c^{-1})

При этом функциональная зависимость для постоянных времени стекания зарядов λ от температуры изменяется по закону Аррениуса:

$$\lambda = B_0 \exp\left(-\frac{\Delta E_\lambda}{RT}\right), \quad (2.20)$$

где B_0 – коэффициент, мало зависящий от температуры;

ΔE_λ – энергия активации процесса стекания зарядов, Дж;

R – универсальная газовая постоянная, $= 8,31 \text{ Дж}/(\text{моль} \cdot \text{К})$.

T – температура, $^\circ K$.

В логарифмических координатах полученные зависимости описываются прямыми линиями, наклон которых в пределах погрешностей измерений совпадает с наклоном прямой со значениями давления насыщенного пара в атмосферном воздухе над плоской поверхностью воды. При этом функциональная зависимость для постоянных времени стекания зарядов от температуры изменяется по

экспоненциальному закону.

Энергии активации двух процессов, а именно: скорость релаксации зарядов и содержание паров воды в атмосферном воздухе и, следовательно, и на поверхности образцов, при воздействии температуры совпадают, поэтому их идентичность и взаимосвязь очевидна. Выявленные закономерности изменений трибоэлектрических свойств образцов в различных климатических условиях подчиняются закону Аррениуса, согласуются с описательными моделями и не противоречат литературным данным [365, 368], что поможет нам прогнозировать механизмы, определяющие поведение материалов в различных условиях.

2.5. Разработка автоматизированного экспресс-метода измерения времени релаксации электростатических зарядов

Важнейшей характеристикой, влияющей на трибоэлектрические свойства материалов, является постоянная времени релаксации заряда. Наши измерения показали, что ее значения для различных обувных материалов изменяется в широком диапазоне и иногда бывают трудноуловимы.

Исходя из этого нами разработана экспресс-методика измерения времени релаксации электростатического заряда на базе установки для изучения трибоэлектрических свойств материалов путем подключения считывающего устройства камертонного датчика к компьютеру, которая позволяет эффективно регистрировать время релаксации электростатического заряда различных материалов в автоматическом режиме. Схема установки представлена на рис. 2.37 [54, 114].

Основные элементы измерения времени релаксации электростатического заряда: пластины 1 конденсатора, стойки 2, вибрационный датчик 3 измерительного преобразования, считывающее устройство 4 вибрационного датчика, испытуемый образец 5, изоляторы 6, заземление 7, биполярный ионизатор воздуха 8 и компьютер 9 [114].

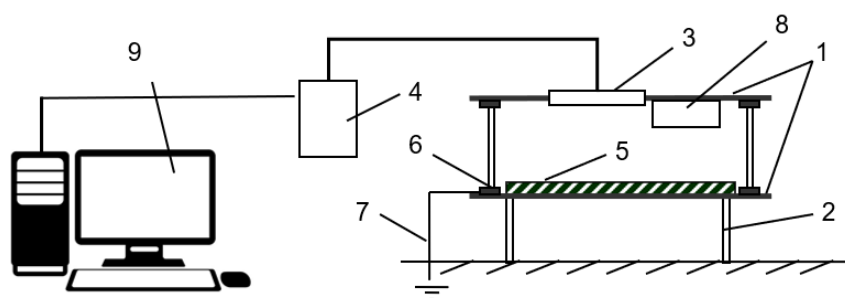


Рис. 2.37. Схема экспресс-метода измерения времени релаксации электростатического заряда:

1 – металлические пластины, выполняющие функцию конденсатора; 2 – стойки; 3 – камертонный датчик ЭСП; 4 – считывающее устройство камертонного датчика ЭСП; 5 – испытуемый образец; 6 – изоляторы; 7 – заземление; 8 – биполярный ионизатор воздуха; 9 – компьютер

Заряд на испытуемом образце накапливается путем натирания его любым материалом (кожа, картон, пластик, шерсть и др.), или биполярным ионизатором воздуха, способного образовывать на материале как положительные, так и отрицательные заряды [114].

Минимальное время спада, которое возможно измерить с помощью экспресс-метода, составляет 2 секунды при погрешности 15-20% и определяется количеством зафиксированных точек во временном интервале между точками $6,7 \times 10^{-2}$ с (15 измерений за 1 с) за все время измерения. Обработка данных производится автоматически в оболочке Microsoft Office Excel (рис. 2.38).

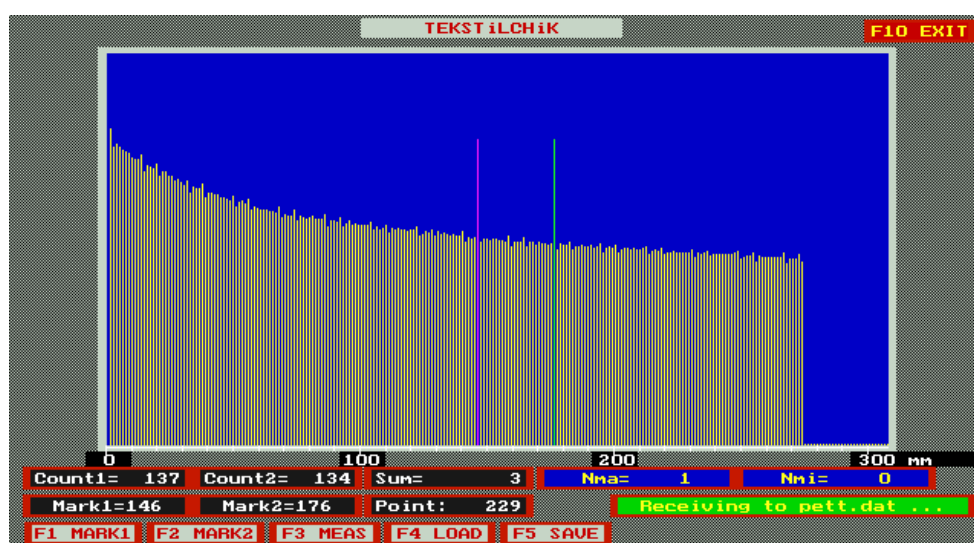


Рис. 2.38. Экранный вид формы снятия данных

По полученным точкам измерения строится зависимость изменения заряда от времени в логарифмическом масштабе (рис. 2.39), а постоянная времени релаксации вычисляется по кривой аппроксимации результатов расчета постоянной времени релаксации заряда по уравнению (2.19).

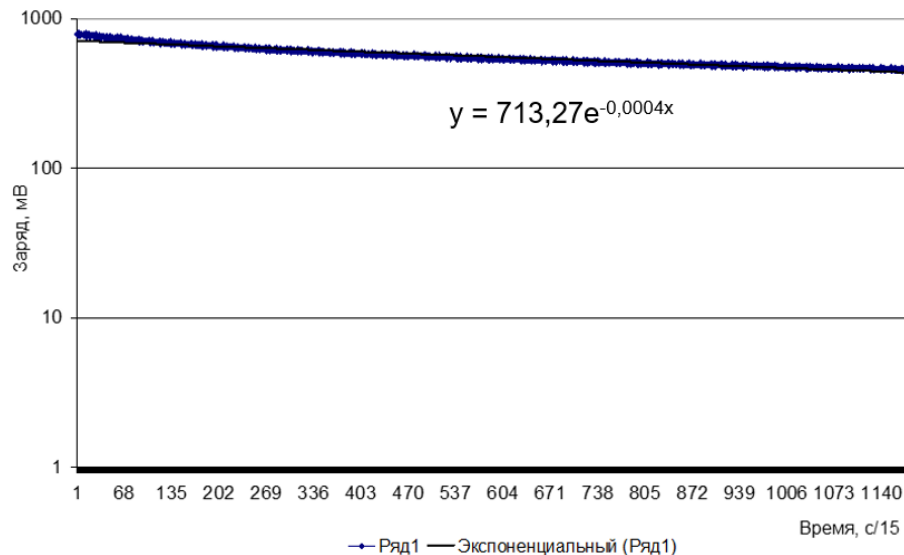


Рис. 2.39. Зависимость изменения электростатического заряда от времени

В ходе предварительных испытаний отмечена высокая повторяемость опытных данных экспресс-метода, для однотипных образцов достигались значения параметра τ , которые различались не более чем на 10-15%.

Применение автоматизированного экспресс-метода обладает несколькими важными преимуществами:

- высокая точность и достоверность получаемых данных в автоматическом режиме за счет использования современного оборудования, включая камертонный датчик ЭСП и считывающее устройство;
- возможность измерять минимальное время спада электростатического заряда (ЭСЗ) в диапазоне всего 2 секунды с допустимой погрешностью в пределах 15-20%, что расширяет перспективы исследования материалов в реальных условиях;
- универсальность и возможность адаптации измерений времени релаксации ЭСЗ не только для обувных, но и других типов материалов, что допускает его

применение для широкого спектра научных исследований и практических приложений.

2.5.1. Определение времени релаксации электростатических зарядов материалов носочно-чулочных изделий

Необходимость исследования трибоэлектрических свойств носочно-чулочных материалов обоснована тем, что именно они непосредственно контактирует с внутренней поверхностью обуви и, следовательно, оказывают влияние на образование электростатического потенциала на теле человека. Кроме того, материалы носочно-чулочных изделий привлекательны для исследований, т.к. имеют примерно одинаковую толщину, плотность, известный состав.

Нами проведены исследования наиболее распространенных материалов носочно-чулочных изделий различного смесового состава, включающего хлопковые, шерстяные, полиамидные, полиэфирные волокна, а также, акрил, эластан, лайкру и др. Каждый смесовой состав материалов различных производителей представлен тремя образцами. При проведении исследований отмечена хорошая повторяемость опытных данных: для одного образца достигались значения постоянной времени релаксации материалов, различавшихся не более чем на 1-2 %. Из диаграммы (рис. 2.40) результатов испытаний образцов изделий одного смесового состава по ГОСТ 8541-2014 [405], но разных производителей видно, что у образцов постоянная времени релаксации варьируется в пределах 5-7 %.

Исследования же образцов различных смесовых составов (рис. 2.41), включающих в себя волокна хлопка и полиамида, показали, что при изменении состава изделий существенно меняется время релаксации заряда и колеблется в пределах 75-80 с при большем содержании в изделии хлопкового волокна. При добавлении в состав ПА время релаксации значительно увеличивается, что говорит о нарастании электризации материала.

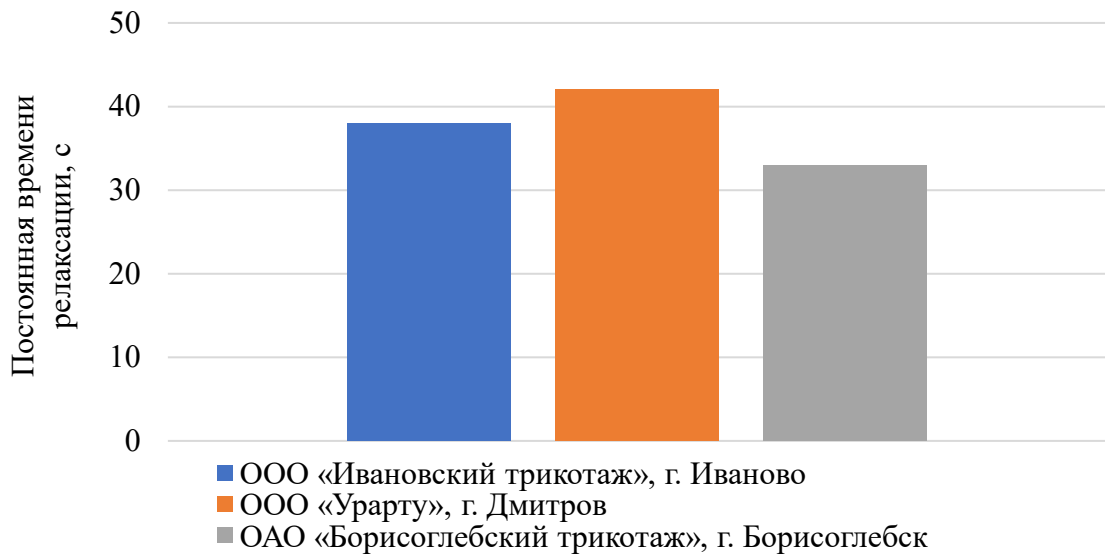


Рис. 2.40. Результаты испытаний образцов материалов со смесовым составом шерсть 67 %, акрил 22 %, ПА 11 %

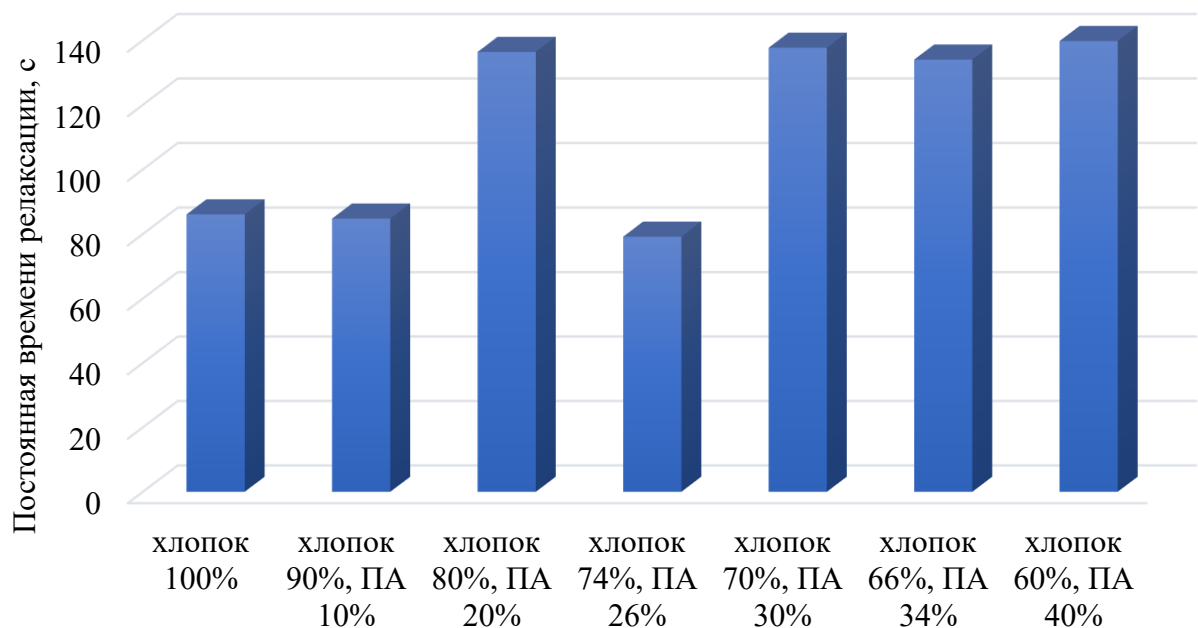


Рис. 2.41. Результаты испытаний образцов материалов различных смесовых составов, включающих в себя волокна полиамида и хлопка

В работе Таточенко И.М. [355] представлен экспериментальный стенд для исследования электризуемости одежных материалов. Испытуемый образец текстильного материала размещают на измерительной пластине, которая изолирована фторопластовыми опорами. Электростатический заряд на измерительной пластине только накапливается и не стекает, что на наш взгляд, не

соответствует реальным условиям эксплуатации. В целях подтверждения этой теории нами проведены испытания образцов носочно-чулочный изделий смесового состава (рис. 2.42).

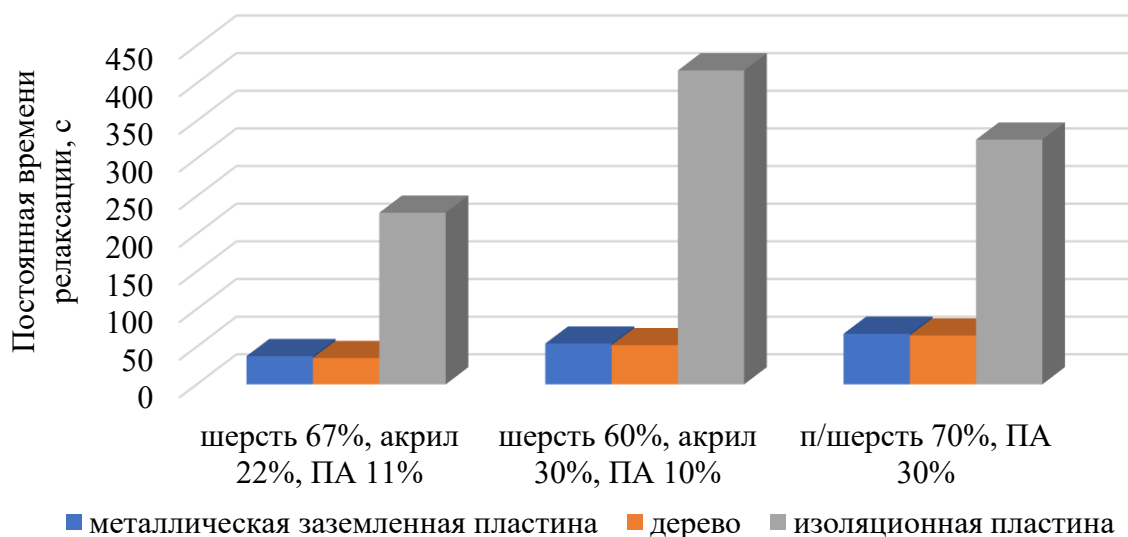


Рис. 2.42. Результаты испытаний образцов материалов на разных пластинах

Очевидно, что если испытуемый образец носочно-чулочного изделия находится на изоляционной пластине, то постоянная времени релаксации многократно превышает результаты измерений на заземленной пластине. Проведенные испытания на деревянной пластине (во многих источниках литературы отмечается, что дерево, как материал, наиболее близок по своим свойствам к коже человека) показали, что постоянная времени релаксации заряда на ней и заземленной пластине – цифры одного порядка.

Исследования носочно-чулочных изделий показали значительное влияние их волокнистого состава на электростатические свойства материалов и демонстрируют высокую повторяемость результатов. Применение экспресс-метода измерения времени релаксации ЭСЗ представляет собой эффективный подход для определения состава волокон, из которых изготовлено изделие. Когда изделие подвергается воздействию статического электричества, отдельные волокна придают материалу определенные электрические свойства, зависящие от их структуры и химического состава. Отслеживая время релаксации зарядов, то есть время, за которое заряд уменьшается до определенного уровня после прекращения

воздействия, можно получить ценную информацию о характере волокон. Создание обширной базы данных, основанной на результатах измерений, обеспечит верификацию состава волокон, из которых изготовлено изделие.

2.5.2. Определение времени релаксации электростатических зарядов материалов верха обуви и промежуточных деталей низа обуви

Выбор материала специальной обуви зависит от характера воздействия вредных факторов и климатических условий [373, 374]. Для оценки стекания электростатического заряда проанализированы распространенные материалы, используемые при изготовлении специальной обуви (табл. 2.11).

Табл. 2.11. Материалы наружных деталей верха обуви

Номер образца	Материал	Толщина, мм
наружных деталей верха обуви		
№ 52	юфть - шагренёв	2,2
№ 53	юфть	2,2
№ 54	хром гидрофобный	2,2
№ 55	ИК кирза двухслойная пластическая	1,4
№ 56	ИК кирза двухслойная пластическая	1,6
№ 57	ИК эластоискожа - юфтин	1,6
внутренних деталей верха обуви		
№ 58	спилок яловый	1,0
№ 59	нетканый материал «Cambrelle» (100% нейлон)	0,8
№ 60	нетканый материал «Cambrelle» на поролоне	1,1
№ 61	нетканый материал - ворсин	1
№ 62	натуральный мех	-
№ 63	искусственный мех	-
№ 64	мех п/шерстяной на трикотажной основе	-
№ 65	сукно шинельное	1,4
промежуточных деталей верха и низа обуви		
№ 66	бязь термопластическая	0,6
№ 67	х/б трикотажное полотно	0,5
№ 68	тик-саржа термопластическая	0,7
№ 69	термопластический материал с двухсторонним нанесением ПУ	1,7
№ 70	термопластический материал с двухсторонним нанесением ПУ	1,5
№ 71	нитроискожа – Т	1,4
№ 72	льносодержащее полотно (20% полиэфир, 80% лен)	2,0
№ 73	материал ИВТЕСН (40% синтетические волокна, 45% синтетическая смола, 15% полипропиленовый текстильный усилитель)	2,1

Наружные детали верха изготавливаются, как правило, из натуральной кожи с гидрофобными свойствами.

В процессе исследований заряд на материале формируется путем трибоэлектризации [375, 376]. Испытания проводились в нормальных климатических условиях, температура окружающей среды составляла 20°C, относительная влажность воздуха $W = 65\%$.

Результаты проведенных испытаний образцов № 52-57 приведены на рис. 2.43. Выявлено, что постоянная времени релаксации электростатических зарядов материалов наружных деталей верха обуви находится в диапазоне от 8 до 18 с.

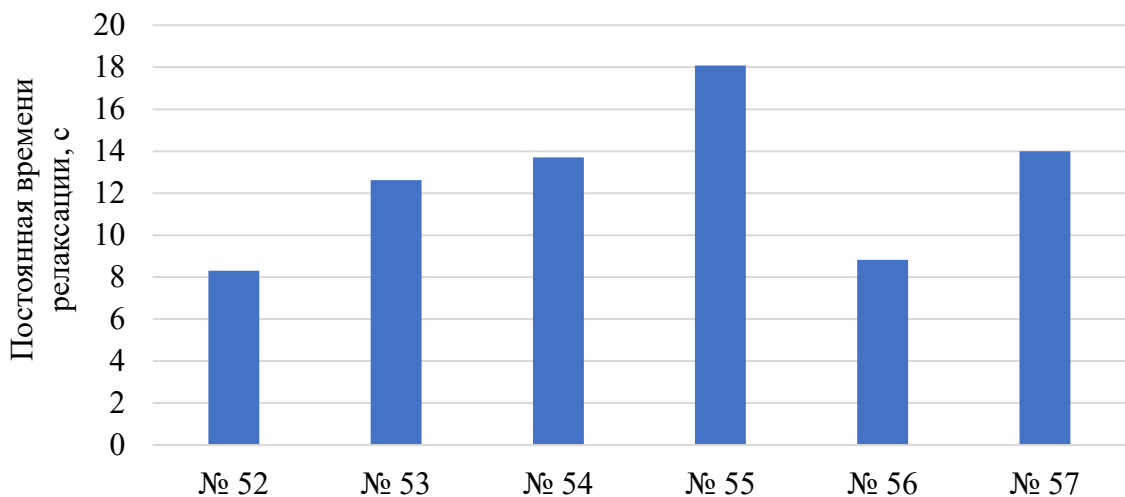


Рис. 2.43. Сводная гистограмма распределения значений постоянной времени релаксации материалов наружных деталей верха обуви

Наблюдается более высокое время релаксации у образца материала № 55 – искусственная кирза двухслойная пластическая – 18 с, что говорит о ее высоком удельном сопротивлении. Материал № 52 – юфть термопластическая шагренёв имеет низкое время релаксации электростатических зарядов.

По результатам испытаний образцов материалов внутренних деталей верха обуви № 58-65 построена сводная гистограмма значений постоянной времени релаксации заряда (рис. 2.44).

Из рис. 2.44 видно, что постоянная времени релаксации электростатических зарядов образцов материалов внутренних деталей обуви находится в диапазоне от 4 до 40 секунд.

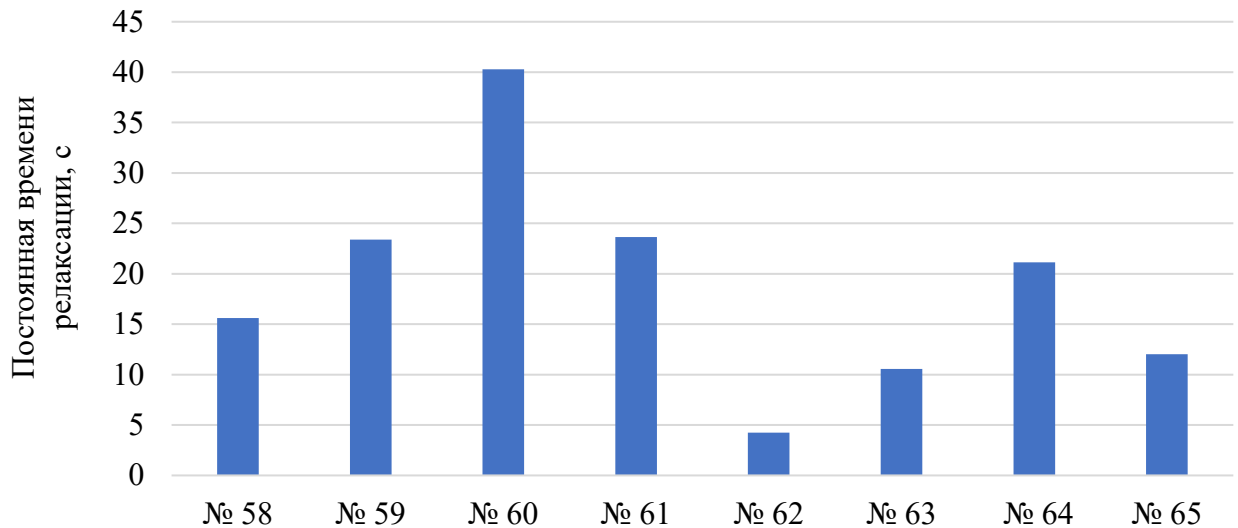


Рис. 2.44. Сводная гистограмма распределения значений постоянной времени релаксации материалов внутренних деталей верха обуви

Наблюдается высокое время релаксации у образца нетканого материала «Cambrelle» на поролоне № 60 – 40,2 с, что говорит о его высоком удельном сопротивлении. Немного меньше значения у образцов материалов № 59, 61, 64 – порядка 20-25 с. Минимальные показания у образца № 62 из натурального меха – около 4 с, что говорит о его низком удельном сопротивлении.

На примере образца № 60 - нетканый материал «Cambrelle» на поролоне – покажем график зависимости изменения электростатического заряда от времени (рис. 2.45). За время испытания около 5 мин стекание заряда происходит очень медленно.

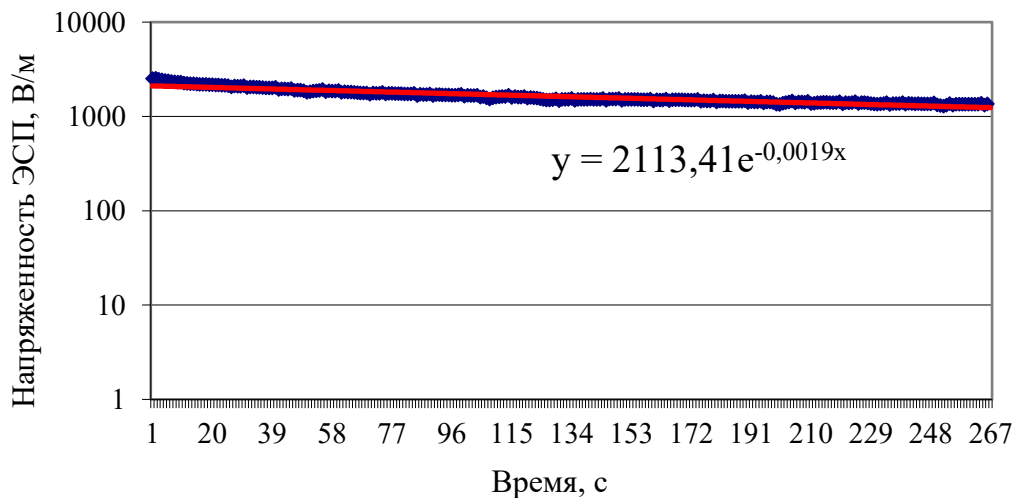


Рис. 2.45. Зависимость изменения электростатического заряда образца № 60 от времени

По результатам испытаний образцов материалов промежуточных деталей верха и низа обуви также построена сводная гистограмма значений постоянной времени релаксации электростатических зарядов (рис. 2.46).

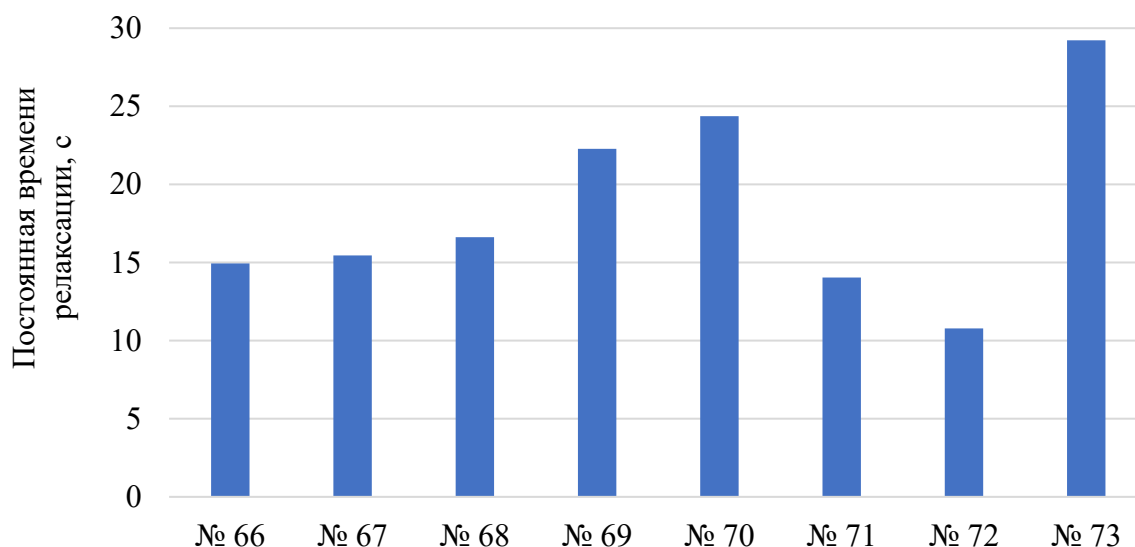


Рис. 2.46. Сводная гистограмма распределения значений постоянной времени релаксации материалов промежуточных деталей верха и низа обуви

Очевидно, что постоянная времени релаксации электростатических зарядов материалов промежуточных деталей верха и низа обуви находится в диапазоне от 10 до 29 секунд. Наблюдается высокое время релаксации у образца материала № 73 (материал для штробельной стельки) – 29 с, что говорит о его высоком удельном сопротивлении. Минимальная постоянная времени релаксации наблюдается у образца, в составе которого содержится лен № 72 – около 10 с.

Измерений постоянной времени релаксации отдельных материалов недостаточно для формирования целостной картины для обуви, как многослойной конструкции. Поэтому проведена имитация пакетов материалов заготовки верха обуви. Составлено 4 пакета материалов носочно-пучковой части обуви (табл. 2.12).

Сводная гистограмма распределения значений постоянной времени релаксации пакетов материалов верха обуви представлена на рис. 2.47.

Табл. 2.12. Пакеты материалов верха обуви

№ пакета	Слой	Материал слоя
1	1 слой (наружный)	№ 52 юфть шагрень
	2 слой (промежуточный)	№ 69 термопластический материал с двухсторонним нанесением ПУ
	3 слой (внутренний)	№ 58 спилок яловый
2	1 слой (наружный)	№ 55 ИК кирза 2-х слойная пластическая
	2 слой (промежуточный)	№ 69 термопластический материал с двухсторонним нанесением ПУ
	3 слой (внутренний)	№ 62 натуральный мех
3	1 слой (наружный)	№ 54 хром гидрофобный
	2 слой (промежуточный)	№ 69 термопластический материал с двухсторонним нанесением ПУ
	3 слой (внутренний)	№ 64 мех п/шерстяной на трикотажной основе
4	1 слой (наружный)	№ 53 юфть
	2 слой (промежуточный)	№ 70 термопластический материал с двухсторонним нанесением ПУ
	3 слой (внутренний)	№ 60 нетканый материал «Cambrelle» на поролоне

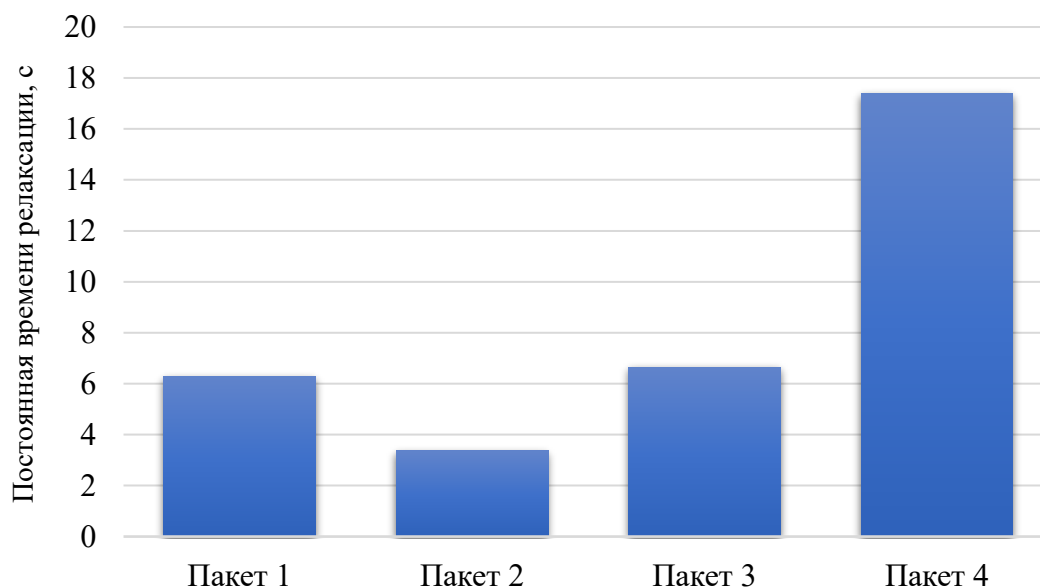


Рис. 2.47. Сводная гистограмма распределения значений постоянной времени релаксации пакетов материалов верха обуви

Постоянная времени релаксации электростатических зарядов пакетов материалов верха обуви находится в диапазоне от 3 до 17 с. По результатам испытаний можно сказать, что свойства пакетов материалов зависят не от свойств материала наружных деталей, а скорее от свойств подкладочных материалов. Так во 2-ом пакете - подкладочный материал натуральный мех, постоянная времени релаксации около 4 с, тогда как у 4-го пакета - подкладка из нетканого материала «Cambrelle» постоянная времени релаксации составляет 20 с.

Проведенные измерения постоянной времени релаксации электростатических зарядов материалов верха обуви, т.е. время, в течение которого электрический заряд материала при свободной утечке снижается до уровня фона показали, что максимальные значения времени релаксации электростатических зарядов продемонстрировал образец материала № 60 (нетканый материал «Cambrelle», дублированный поролоном) 40 с, минимальные показатели у образца № 62 (натуральный мех) – около 4 с. Так как релаксация является функцией времени и определяется проводимостью материала, то можно с уверенностью полагать, что как материалы, так и пакеты материалов с минимальным временем релаксации электростатических зарядов будут в значительной степени отвечать критериям электростатической безопасности.

Таким образом, автоматизированный экспресс-метод измерения времени релаксации электростатического заряда позволяет проводить исследования широкого ассортимента обувных материалов (деталей верха) и осуществлять их рациональный выбор для конструкций специальной обуви удовлетворительной электростатической безопасности.

2.5.3. Определение времени релаксации электростатических зарядов подошвенных материалов

Для понимания поведения материалов низа обуви относительно опорных поверхностей проведены испытания наиболее применяемых в обуви материалов,

таких как кожа, резина, полиуретан и др. [377]. Из широкого ассортимента выбраны 7 подошвенных материалов и 7 опорных поверхностей (табл. 2.13).

Табл. 2.13. Ассортимент исследованных подошвенных материалов и опорных поверхностей

Материалы низа обуви	Названия опорных поверхностей
Кожа подошвенная	Ковролин (100 % полипропилен)
Кожволон	Линолеум № 1 (100% ПВХ)
Резина монолитная на основе стирол-бутадиенового каучука	Линолеум № 2 (ПВХ на войлочной основе)
Резина микропористая на основе стирол-бутадиенового каучука	Керамическая плитка
Дивинилстирольный термоэластопласт (ТЭП)	Дерево
Термополиуретан (ТПУ)	Пробковое покрытие
Пластикат поливинилхлорида (ПВХ)	Асфальт

Исследования показали (рис. 2.48, 2.49), что для материалов напольных покрытий постоянная времени релаксации различна, зависит от их удельного электрического сопротивления и колеблется в пределах от 35 до 300 с.

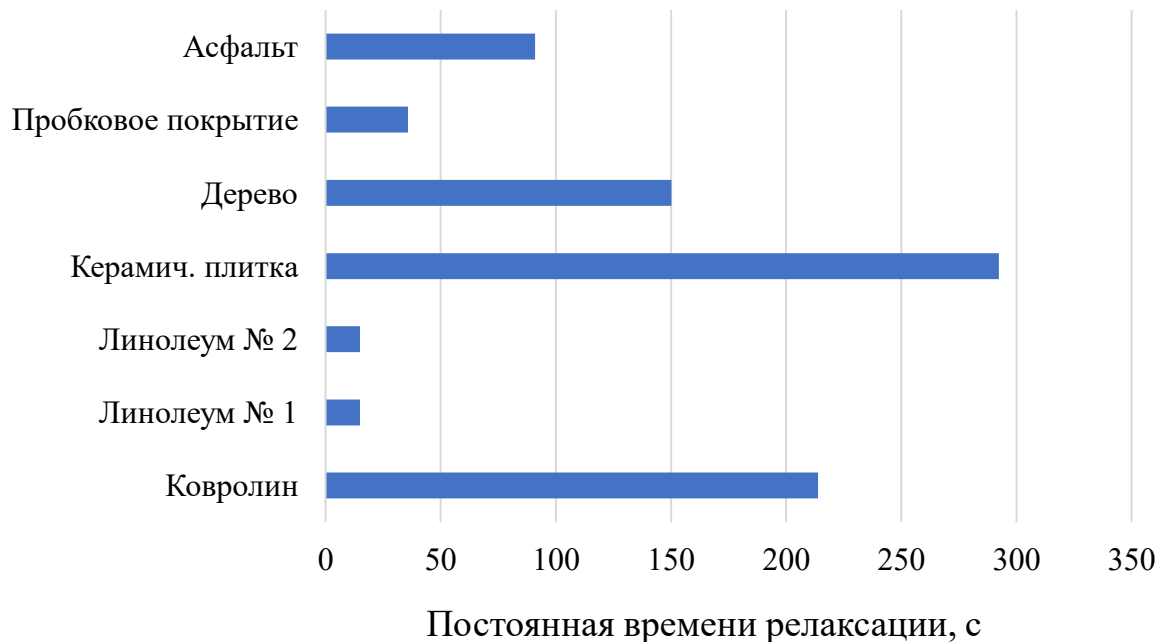


Рис. 2.48. Время релаксации электростатического заряда напольных покрытий



Рис. 2.49. Время релаксации электростатического заряда материалов наружных деталей низа обуви

Наиболее высокое значение показала керамическая плитка: время релаксации достигает 300 с; минимальное время релаксации заряда у линолеумов (не более 20 с). Постоянная времени релаксации материалов низа обуви колеблется в пределах от 47 до 200 с: наибольший показатель зафиксирован у термоэластопласта, а наименьший - у натуральной подошвенной кожи.

Время релаксации заряда – стекание заряда – процесс снижения энергии и поверхностной плотности заряда находится в диапазоне от 20 до 300 с у опорных поверхностей; от 50 до 200 - у материалов низа обуви. Стеkanie заряда с материалов – фактор, ограничивающий электростатические эффекты. Следовательно, скорость релаксации заряда напрямую определяет уровень проводимости материалов и является важным параметром.

Очевидно, что напряженность ЭСП и время релаксации ЭСЗ системы «обувь – опорная поверхность», являются определяющими, но не единственными для описания ее трибоэлектрических свойств. Вместе с тем, результаты измерений могут составить основу для разработки методов по исключению/снижению накопления зарядов статического электричества, а также прогнозированию процессов стекания заряда с тела человека на опорную поверхность.

ВЫВОДЫ ПО ВТОРОЙ ГЛАВЕ

1. Выявлены основные физические явления, которые обуславливают уровень ЭСБ в различных технологических процессах. Систематизированы виды информации по природе возникновения электростатических зарядов и формированию ее трибоэлектрических эффектов. Выделены основные физические характеристики, которые необходимо учитывать для контроля ЭСБ и предотвращения нежелательных последствий в различных технологических процессах.

2. Установлено, что для исключения формирования воспламеняющих разрядов с человека, необходимо обеспечить быструю утечку зарядов, путем регулирования сопротивления материалов низа обуви и напольных покрытий.

3. Выявлено, что данные о влиянии ЭСП на здоровье человека противоречивы и зависят от многих факторов, таких как напряженность ЭСП, длительность его воздействия и характеристики условий экспериментов.

4. Показано, что возможности использования имеющихся методов исследования трибоэлектрических свойств материалов ограничены: отсутствует компенсация неоднородности ЭСП и техническая возможность непрерывной регистрации динамики изменения ЭСП на поверхности образца, а также возможность изучения трибоэлектрических свойств материалов в различных климатических условиях.

5. Разработан динамический метод и методика измерения трибоэлектрических свойств обувных материалов, которые позволяют экспериментально оценивать накопление и релаксацию электростатического заряда, интенсивно возникающего в результате трения. В процессе измерения определяются величина заряда, его поверхностная плотность, постоянная времени релаксации, что важно для определения электростатической безопасности обуви. Сравнивая разработанный метод с известными методами оценки электростатических свойств материалов, можно отметить, что они, как правило, не предоставляют возможности для измерения электростатических показателей в

динамике, это ограничение существенно сказывается на точности и полноте анализа.

6. Проведенными исследованиями трибоэлектрических свойств материалов наружных, внутренних и промежуточных деталей верха обуви установлено, что при нормальных условиях показатели электризации большинства исследованных образцов материалов, в том числе натуральные, искусственные кожи, не превышают критических значений (15 кВ/м), за исключением образцов текстильных подкладочных материалов, натурального и искусственного меха, показатели которых достигали 30 кВ/м.

7. Проведенные исследования трибоэлектрических свойств материалов наружных, внутренних и промежуточных деталей низа обуви, показали, что для многих материалов значения электризации не превышают пороговые, за исключением отдельных вспененных материалов для вкладных и основных стелек на основе полиуретана и полиэстера.

8. Разработан метод исследования трибоэлектрических свойств материалов в широком диапазоне температур, включающий использование камеры с элементами Пельтье и камертонного датчика ЭСП. Эксперименты показали, что с понижением температуры снижается электропроводность материалов и увеличивается время релаксации зарядов. Метод позволяет оценить критическую температуру окружающего воздуха (-25°C), ниже которой существенно снижается релаксация зарядов статического электричества с поверхности материалов.

9. Выявлено, что закономерности изменений трибоэлектрических свойств образцов в различных климатических условиях подчиняются закону Аррениуса. Результаты экспериментов показывают, что при изменении температуры энергии активации двух процессов: скорость релаксации зарядов и содержание паров воды в атмосферном воздухе, а также на поверхности гидрофобных образцов, – оказываются тесно связаны. Установленные взаимосвязи между указанными процессами могут служить основой для дальнейшего изучения механизмов трибоэлектрических свойств и их практического применения в разработке новых материалов с заданными антистатическими свойствами.

10. Разработан автоматизированный экспресс-метод измерения времени релаксации электростатического заряда для оценки трибоэлектрических свойств материалов. Установка с камертонным датчиком, позволяет измерять минимальное время релаксации в 2 секунды с погрешностью 15-20%. Исследования носочно-чулочных изделий показали значительное влияние состава волокон на электростатические свойства и демонстрируют высокую повторяемость результатов. Разработанный экспресс-метод измерения времени релаксации электростатического заряда рекомендуется к использованию для верификации составов тканей.

ГЛАВА 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СИСТЕМЫ «ОБУВЬ - ЧЕЛОВЕК - НАПОЛЬНОЕ ПОКРЫТИЕ»

3.1. Методики определения электрического сопротивления обуви и обувных материалов и их практическое применение

Электрическое сопротивление материалов низа является ключевым параметром, обеспечивающим антистатическую защиту обуви [103, 104]. Оно гарантирует контролируемое и безопасное отведение заряда, защищая не только пользователя, но и окружающую, производственно-пространственную среду от потенциальных рисков, связанных со статическим электричеством. Документы, нормирующие электростатическое сопротивление обуви детально представлены в Главе 1.

3.1.1. Методики измерения поверхностного удельного электрического сопротивления материалов

Измерение удельного объемного и поверхностного электрического сопротивления обувных материалов регламентирует ГОСТ 25937-83 «Материалы обувные. Метод определения удельных объемного и поверхностного электрических сопротивлений» [29]. Испытания проводятся на установке, включающей датчик и измеритель электрических сопротивлений – тераомметр Е6-13А или ЕК6-7 [101]. Показатели удельного электрического сопротивления определяют на пробах материалов только с гладкой поверхностью [76].

Измерение поверхностного и объемного сопротивления текстильных материалов регламентируется ГОСТ 19616-74 «Ткани и трикотажные полотна. Метод определения удельного поверхностного электрического сопротивления» [80]. Испытания проводятся на приборе системы ВНИИПХВ марки ИЭСТП-1 для определения поверхностного электрического сопротивления ткани и трикотажных

полотен. Он включает два самостоятельных блока: датчик и измеритель электрического сопротивления.

Измерения удельного объемного и поверхностного электрического сопротивления согласно ГОСТ, имеют некоторые технические недостатки, связанные с устаревшей приборной базой, поэтому актуальны новые экспериментальные методики с использованием современных средств измерений.

Один из современных методов представлен в ГОСТ IEC 61340-2-3-2023 «Электростатика. Методы определения сопротивления и удельного сопротивления твердых материалов, используемых для предотвращения накопления электростатического заряда» [26].

В качестве средств измерения сопротивления служат измеритель сопротивления (тераомметр) или источник питания и амперметр с параметрами, обеспечивающими измерения сопротивления с погрешностью $\pm 10\%$. При проведении испытаний необходимо принять меры по снижению электрической опасности. Если в используемом для измерения объемного сопротивления тераомметре не предусмотрена функция считывания тока, то в измерительной схеме применяют амперметр с диапазоном измерений от 10 пкА до 10 мА с точностью $\pm 5\%$.

Для измерений сопротивлений материалов в диапазоне $1 \cdot 10^6$ Ом и более к электродам подводится напряжение 100 В ($\pm 5\%$), фиксируется проходящий ток и вычисляется сопротивление. Для сопротивлений $1 \cdot 10^6$ Ом и менее устанавливается напряжение 10 В ($\pm 5\%$).

Рабочий диапазон средства измерения должен быть равным $1,0 \cdot 10^3 - 1,0 \cdot 10^{13}$ Ом.

Электроды должны быть из материала, который обеспечивает плотный контакт с поверхностью испытуемого образца и не допускает существенного искажения значений измерений в результате добавления сопротивления собственно электрода или загрязнения испытуемой поверхности. Материал электрода должен быть устойчив к коррозии и не вступать в химическую реакцию с материалом образца.

При проведении измерений применяют электроды, конструкция которых описана в стандарте [26]. Для определения сопротивления рассеивающих материалов используют кольцевые электроды, имеющие достаточное пространство между центральным (измерительным) и кольцевым (охранным) контактами для минимизации блуждающих паразитных токов. Конструкция электрода представляет собой центральный диск, окруженный кольцом из проводящего материала, который контактирует с испытуемым образцом (рис. 3.1).

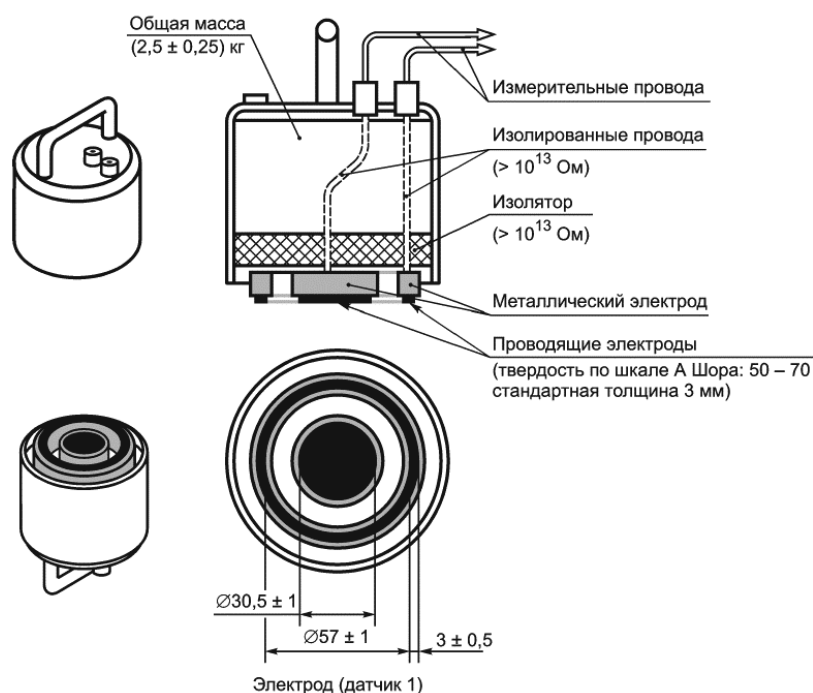


Рис. 3.1. Конструкция электрода для измерения поверхностного и объемного сопротивлений

Контактная поверхность материала должна иметь объемное сопротивление менее 10^3 Ом, при испытании на чистом, нержавеющей металлическом (не алюминиевом) противоэлектроде с приложенным испытательным напряжением 10 В. Испытуемый материал должен размещаться на плоской гладкой подставке с поверхностным сопротивлением более 10^{13} Ом в соответствии со стандартами ГОСТ 6433.2-71 [81] и ГОСТ Р 50344-92 [82]. Размер подставки должен превышать размер материала минимум на 1 см с каждой стороны, толщина подставки должна быть не менее 1 мм.

Подготовку и маркирование образцов не следует проводить в помещении, где проводят измерения. Если точки приложения электродов были изменены, это

необходимо указать в отчете об измерениях. При измерении поверхностного сопротивления поверхность материала не должна подвергаться внешним воздействиям (очистка, пропитка и т.д.). Для минимизации возможной вероятности образования путей утечки токов, искажающих результаты измерений, приложение электродов к материалу и монтаж их в схеме измерения следует проводить согласно инструкции.

Образцы должны иметь простую геометрическую форму: прямоугольную со сторонами (8 x 12) см или круглую диаметром не менее 11 см. Испытание проводят на трех образцах материала, имеющих четкую маркировку.

Комплект электродов соединяют с измерительным оборудованием (рис. 3.2). Испытуемый образец помещают на подставку испытуемой поверхностью вверх. Комплект электродов помещают в центр поверхности или на расстоянии не менее 1 см от всех сторон.

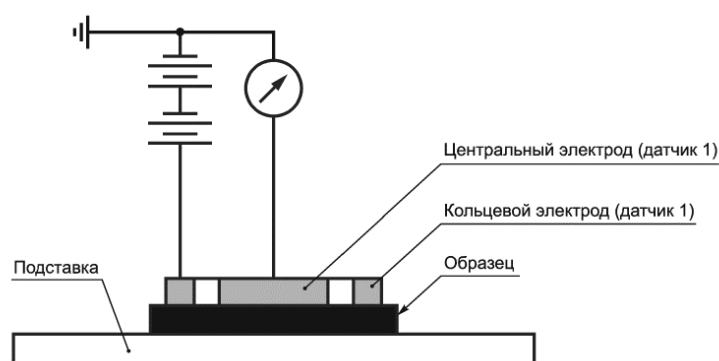


Рис. 3.2. Принцип подключения электродов для измерения поверхностного сопротивления

Измерения проводят при напряжении 10 В и через 15 с снимают показания. Если измеренное значение сопротивления менее $1,0 \cdot 10^6$ Ом, записывают результат и продолжают измерения. Если измеренное сопротивление больше или равно $1,0 \cdot 10^6$ Ом, измерения повторяют при напряжении 100 В. Результат записывают после окончания периода установления показаний.

При проведении испытаний по схеме «от точки до точки» два электрода соединяют с измерительным оборудованием. Образец помещают на подставку испытуемой стороной вверх. Датчики должны быть расположены на поверхности образца в соответствии с рекомендациями изготовителя или другим образом, но на

расстоянии не менее 25 см между ними вдоль образца и не менее 5 см от краев образца (рис. 3.3).

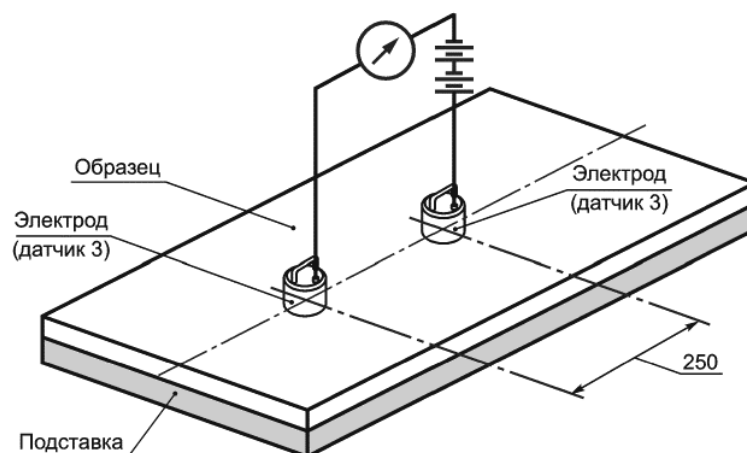


Рис. 3.3. Принцип измерения сопротивления «от точки до точки»

Испытания проводят при напряжении 10 В и их результаты фиксируют через каждые 15 с. Если измеренное сопротивление меньше $1,0 \cdot 10^6$ Ом, то исследования продолжают. Если установленное сопротивление больше или равно $1,0 \cdot 10^6$ Ом, то испытания повторяют при напряжении 100 В.

Поверхностное удельное сопротивление рассчитывают по формуле:

$$p_s = R_x(d_1 + g) * \frac{\pi}{g}, \quad (3.1)$$

где p_s – поверхностное удельное сопротивление, Ом;

R_x – измеренное поверхностное сопротивление, Ом;

d_1 – диаметр внутреннего контактного электрода, м;

g – расстояние между контактными электродами, м.

Измерения электрического сопротивление подошвы обуви согласно этой методики можно проводить также с помощью прибора VKG A-770 при относительной влажности и температуре окружающего воздуха. VKG A-770 совмещает три измерительных прибора: тераомметр, гигрометр и термометр. Характеристики прибора представлены в табл. 3.1.

Табл. 3.1. Характеристики прибора VKG A-770

Показатель	Величина показателя
Диапазон измерения сопротивления при тестовом напряжении 100 В	от 1 МОм до 999 ГОм
Погрешность измерения сопротивления	2,5% (1 кОм – 10 ГОм) 5% (10 ГОм – 100 ГОм) 10% (100 ГОм – 999 ГОм)
Габаритные размеры	315×130×60 мм
Масса	700 г

Прибор позволяет производить запись 100 измерений во внутреннюю энергонезависимую память. Просмотр записей осуществляется как непосредственно на дисплее А-770, так и на мониторе ПК при помощи специализированной программы. Связь А-770 с ПК осуществляется по каналу USB, питание прибора - от аккумуляторных батарей или сетевого адаптера с одновременной подзарядкой аккумуляторов [83].

Для исследования электрического сопротивления материалов обуви нами выбрана методика измерения удельного объемного и поверхностного электрических сопротивлений согласно ГОСТ IEC 61340-2-3-2023 [26], поскольку он предлагает современные методы определения этих характеристик материалов, учитывает актуальные требования к средствам диагностирования, что положительно отражается на надежности и точности результатов исследований в данной области.

3.1.2. Исследование электрического сопротивления материалов обуви специального назначения

Для более полного понимания электростатических свойств обувных материалов перейдем к изучению электрического сопротивления [95], которое проводилось в соответствии с ГОСТ IEC 61340-2-3-2023 [26] с применением прибора VKG A-770.

Специализированная обувь является многокомпонентной конструкцией, ее антистатические свойства формируются за счет материалов отдельных деталей,

которые изготавливаются из композитных волокнисто-пористых [86], тканых и нетканых материалов [79]. В производственных технологических процессах температура окружающей среды или внутриобувного пространства не постоянна, а изменяется в допустимом диапазоне, что приводит к изменению электропроводности материалов.

Для определения влияния изменения температуры окружающей среды на поверхностное удельное сопротивление проведены исследования нескольких композитных многослойных, тканых, нетканых и волокнисто-пористых материалов обуви, имеющих антистатические свойства, характеристики которых представлены в табл. 3.2 (нумерация образцов, принятая в Главе 3).

Табл. 3.2. Характеристики образцов материалов

№ образца	Описание
1	Двухслойный композитный материал; верхний слой -микрофибра, нижний слой - пенополиуретан с наполнением графитом со стороны микрофибры
2	Двухслойный композитный материал; верхний слой микрофибра, нижний слой пенополиуретан с наполнением графитом со стороны пенополиуретана
3	Пенополиуретан, с наполнением графитом
4	Тканый материал: 100% пара-арамидное волокно -K29 Kevlar®
5	Тканый материал: 99 % полиэфир; 1 % проводящее карбоновое волокно
6	Тканый материал: 99 % х/б, 1 % проводящее карбоновое волокно
7	Нетканый материал: 98 % полиэфир, 2 % - проводящее карбоновое волокно
8	Натуральная кожа, покрытая отделочной композицией (стандартная аппретура)
9	Натуральная кожа, покрытая отделочной композицией с 7,4 % содержанием суспензии алюминия
10	Натуральная кожа, покрытая отделочной композицией с 37 % содержанием суспензии алюминия, второй слой – стандартная аппретура
11	Натуральная кожа, покрытая отделочной композицией с 37 % содержанием суспензии алюминия
12	Натуральная кожа, покрытая отделочной композицией с 37 % содержанием суспензии алюминия, второй слой – стандартная аппретура, третий слой - нитроцеллюлозный лак

Образцы нагревались до 20°C, 25°C, 30°C, 35°C и 40°C, через каждые 5°C измерялось электрическое сопротивление. Для экспериментов отбиралось не менее

6 образцов однотипных материалов. Обработка результатов экспериментов проводилась стандартными методами математической статистики.

В результате проведенных экспериментальных исследований нами получены данные (рис. 3.4-3.6), анализ которых показал, что синтетические материалы (см. рис. 3.4 - образцы № 1, 2, 3) демонстрируют линейную зависимость, а с ростом температуры с 20°C до 40°C наблюдается увеличение уровня электрического сопротивления – образец № 1 в 1,3 раза, образец № 2 в 16 раз, образец № 3 в 1,4 раза. У образцов № 4, 5, 6 и 7 (см. рис. 3.5) при повышении температуры электрическое сопротивление практически не изменяется, т.е. их термостойкие свойства достаточно высоки. У образцов натуральных кож (см. рис. 3.6) с возрастанием температуры электрическое сопротивление падает в среднем в 3 раза. Это связано с тем, что образцы были обработаны суспензией алюминия, которая и влияет на их электрические свойства. При нагревании происходят изменения, приводящие к повышенной подвижности зарядов, что, в свою очередь, обуславливает снижение электрического сопротивления.

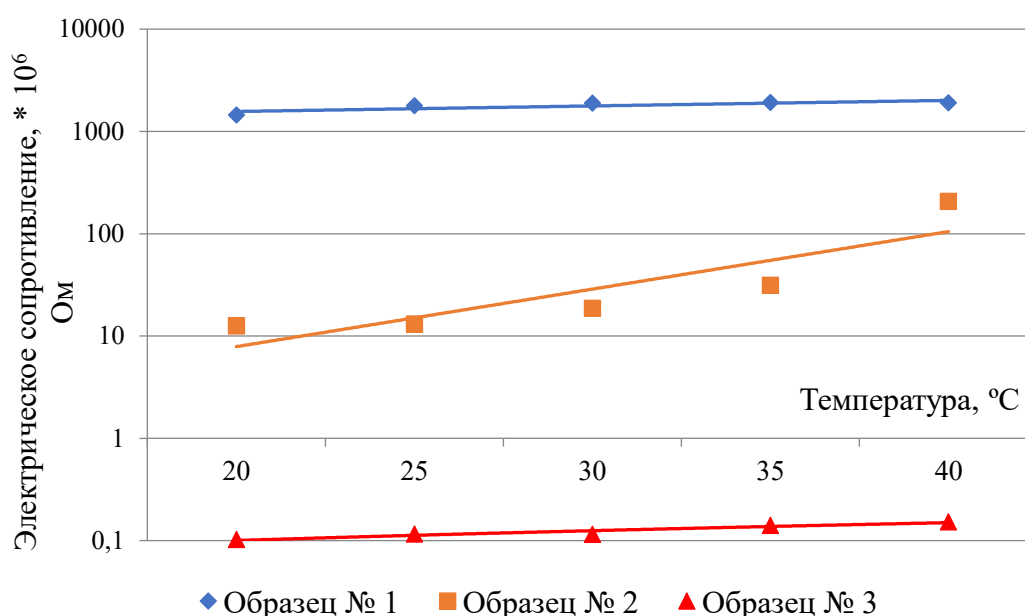


Рис. 3.4. Зависимость электрического сопротивления от температуры образцов № 1, 2 и 3 [95]

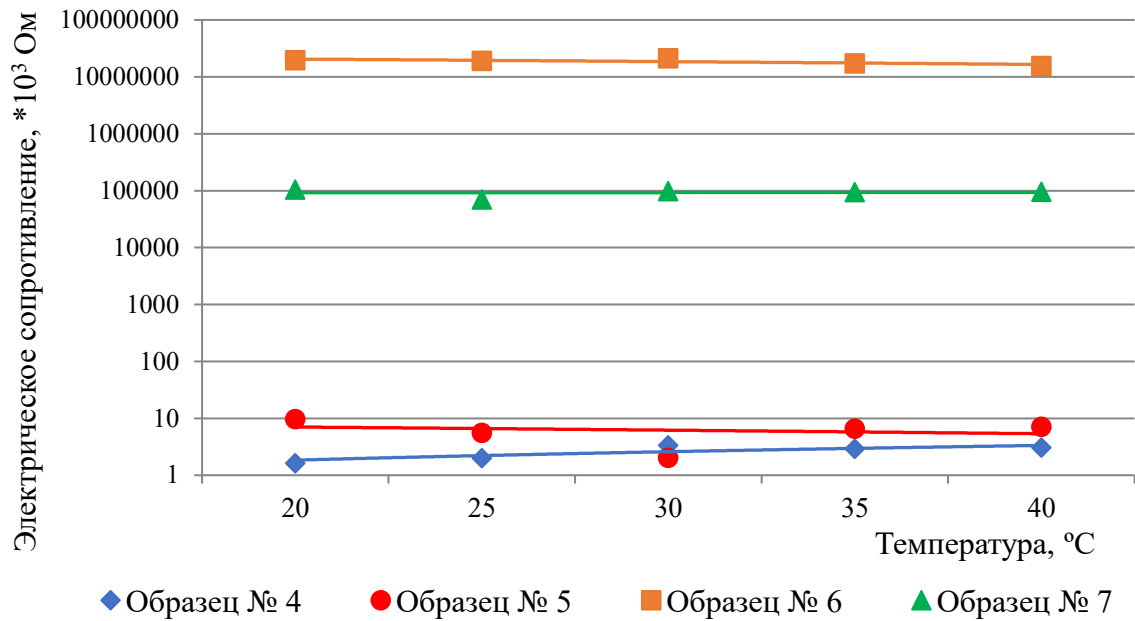


Рис. 3.5. Зависимость электрического сопротивления от температуры образцов № 4 - 7 [95]

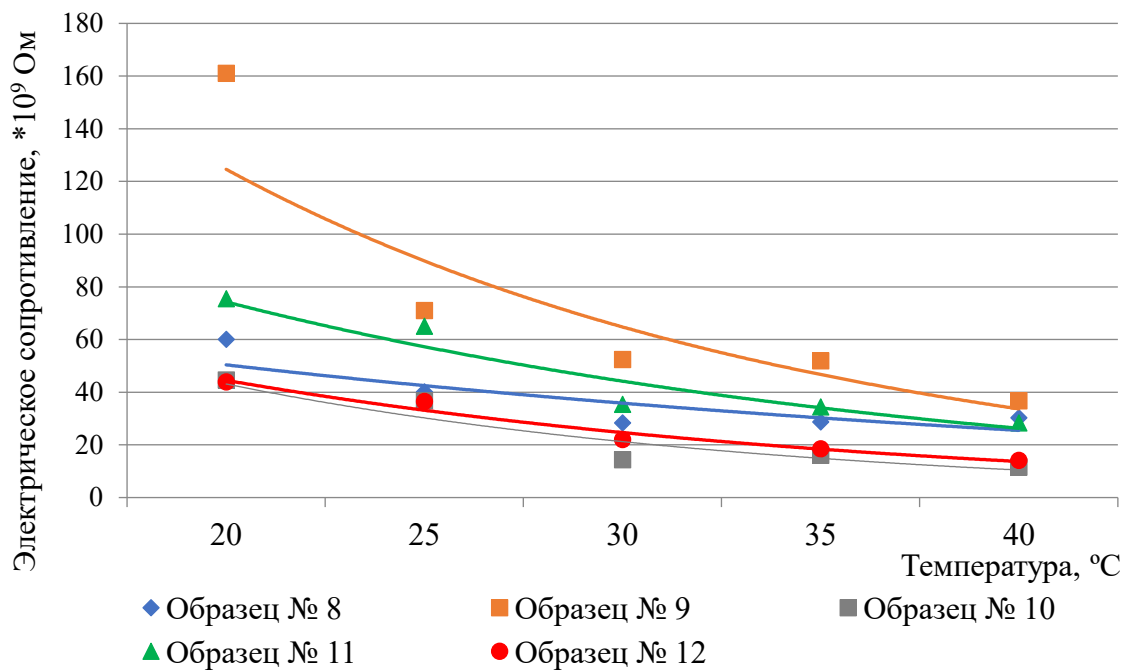


Рис. 3.6. Зависимость электрического сопротивления от температуры образцов № 8-12 [95]

На основе полученных данных составлена табл. 3.3, которая соотнесена с ранее разработанной классификацией диапазонов электрического сопротивления (см. рис. 1.1). Диапазон 10^2 Ом до 10^5 Ом – зона проводящих материалов, диапазон 10^5 до 10^8 Ом – рассеивающих материалов, диапазон 10^9 до 10^{14} Ом – изоляционных

материалов, которые не подходят для антистатической обуви, так как накапливают электростатические заряды, что может привести к искрообразованию.

Табл. 3.3. Показатели электрического сопротивления образцов [95]

№ образц а	Электрическое сопротивление, Ом		
	Диапазоны		
	$10^2 - 10^5$	$10^5 - 10^8$	$10^9 - 10^{14}$
1			$2,9 \cdot 10^9$
2		$5,4 \cdot 10^7$	
3		$1,1 \cdot 10^5$	
4	$1,6 \cdot 10^3$		
5	$2,3 \cdot 10^3$		
6			$7,9 \cdot 10^{10}$
7		$1,0 \cdot 10^8$	
8			$6,4 \cdot 10^{10}$
9			$1,7 \cdot 10^{11}$
10			$6,6 \cdot 10^{10}$
11			$1,3 \cdot 10^{11}$
12			$6,7 \cdot 10^{10}$

Выявлено, что для изготовления антистатической обуви подходят образцы материалов № 2, № 3 и № 7, т.к. их показатели электрического сопротивления укладываются в диапазон, который регламентируется стандартом ГОСТ Р ЕН ИСО 20345-2011 в соответствии с разработанной классификацией (см. рис. 1.1) [18]. Таким образом, электростатическая безопасность обуви напрямую связана с материалами, используемыми в конструкции, и факторами внешней среды, что необходимо учитывать при их подборе для специальной антистатической обуви и/или разработке новых.

3.1.3. Установление корреляционных зависимостей антистатических показателей материалов обуви специального назначения

Предпринята попытка установления корреляционных зависимостей 2-х основных антистатических показателей - напряжённости ЭСП и электрического сопротивления для прогнозирования антистатических свойств материалов.

Применение на практике методики измерения напряженности ЭСП с использованием прибора СТ-01 в соответствии с ГОСТ 32995-2014 «Материалы текстильные. Методика измерения напряженности электростатического поля» [24] и поверхностного электрического сопротивления в соответствии с ГОСТ ИЕС 61340-2-3-2023 «Электростатика. Методы определения сопротивления и удельного сопротивления твердых материалов, используемых для предотвращения накопления электростатического заряда» [26], позволяют подбирать для изготовления обуви материалы с антистатическими свойствами и отбраковывать не удовлетворяющие перечисленным выше критериям. Для проведения исследования антистатических показателей подкладочных и стелечных материалов нами выбраны их образцы с различным химическим составом (табл. 3.4).

Табл. 3.4. Материалы стелек и подкладки верха обуви

№ образца	Материал
1	2
13	Триплированный материал - ИК + пенополиуретан + полиамид
14	Триплированный материал - ИК + пенополиуретан + вискоза
15	Натуральная кожа
16	Дублированный материал - полиэфир + пенополиуретан
17	Дублированный материал - полиэфир + пенополиуретан
18	Дублированный материал - полиамид + пенополиуретан
19	Дублированный материал - полиэфир + пенополиуретан
20	Дублированный материал - полиэфир + пенополиуретан
21	Дублированный материал - полиэфир/полиамид + хлопок
22	100% полиэфир
23	100% хлопок
24	100% полиэфир
25	100% хлопок
26	100% полиамид
27	100% хлопок
28	45% хлопок, 22% в/ш, 22% п/э, 11% лён

1	2
29	50% хлопок, 50% вискоза
30	100% п/э
31	99% хлопок, 1% антистатическая нить
32	100% латекс
33	100% пара-арамидное волокно K29 Kevlar®
34	98 % полиэфир, 2 % проводящее карбоновое волокно
35	99% полиэфир, 1% проводящее карбоновое волокно
36	100% хлопок
37	79% хлопок, 20% п/э, 1% антистатическая нить
38	87% хлопок, 12% нейлон
39	80% хлопок, 19% п/э, 1% антистатическая нить
40	100% хлопок
41	98% п/э, 2% антистатическая нить
42	100% хлопок
43	60% модакрил, 39% хлопок, 1% антистатическая волокно

Методика, прописанная в ГОСТ 32995-2014 [24] заключается в следующем: образец материала размещается на плоском металлическом электроде, что обеспечивает необходимое электрическое соединение для измерений, валик для натирания образца обернут одним слоем 100 %-ной полиамидной ткани, после 5-ти кратного воздействия, которым производят измерение напряженности ЭСП, фиксируя максимальное значение. Метод предполагает проведение измерений в пяти различных точках образца, и в каждой из этих точек необходимо провести четыре измерения. По нормативу [24] предельно допустимый уровень напряженности электростатического поля на поверхности текстильных материалов и изделий из них не должен превышать 15 кВ/м.

Перед основным экспериментом нами проведены разведывательные исследования [99, 100], которые позволили заключить, что:

- уровень трибоэлектрического поля испытуемого материала выходит в режим насыщения практически при 5-ти кратном воздействии валика на его поверхность. Увеличение циклов воздействия до 10-ти повышает напряженность поля не более чем на 10%;

- заземление проводящей поверхности валика, которая граничит с его чехлом из полиамидной ткани, приводит к уменьшению уровня трибоэлектрического поля

над поверхностью испытуемого материала на 10-40%, следовательно, это действие выполнять не рекомендуется;

- увеличение силы трения между поверхностями испытуемого материала и валика повышает трибоэлектрический эффект на 70-200%, что не противоречит теоретической модели трибоэлектрического процесса;

- два различных способа передвижения валика по поверхности испытуемого материала путем скольжения или прокатывания, когда задействованы различные силы трения (сила скольжения или сила качения, соответственно) электростатические поля между поверхностями двух материалов, равнозначны, так как существенных отличий в значениях уровней электростатических полей при этом не обнаружено [100].

Каждый, принятый к исследованию образец подвергался трем испытаниям по методике [24], при этом показатели напряженности ЭСП фиксировались каждые 6 секунд в течение минуты после воздействия на образец валиком. Ниже представлены типичные результаты испытаний образцов материалов верха обуви (рис. 3.7).

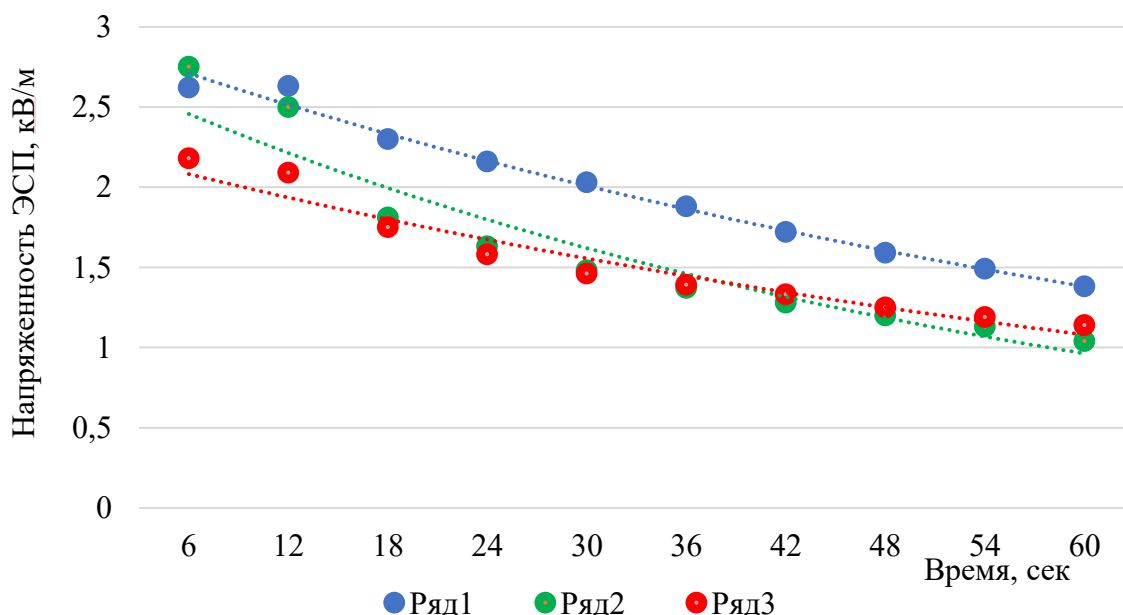


Рис. 3.7. Зависимость напряженности ЭСП от времени у образца № 14 (три испытания)

Сводная гистограмма распределения средних величин напряженности ЭСП образцов представлена на рис. 3.8.

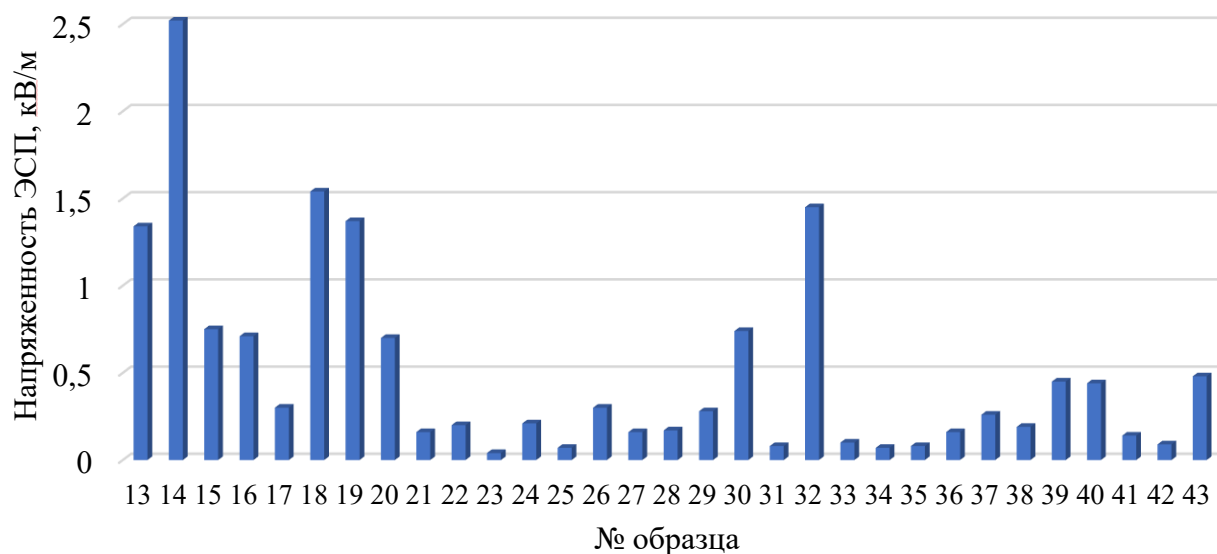


Рис. 3.8. Сводная гистограмма распределения средних величин напряженности ЭСП испытанных образцов материалов стелек и подкладки верха обуви

Испытания позволили выявить тенденцию постепенного во времени снижения напряженности ЭСП на поверхности образца, что подтверждает теоретическую модель трибоэлектрического процесса, то есть релаксацию электростатического заряда. Исходя из полученных данных можно сделать вывод, что ни на одной поверхности образцов не зафиксирована напряженность, превышающая 15 кВ/м, что не противоречит требованиям стандарта [100].

Результаты оценки поверхностного электрического сопротивления испытуемых материалов, проведенной по методике ГОСТ ИЕС 61340-2-3-2023 [26] представлены на рис. 3.9. Для каждого образца электрическое сопротивление измерялось в десяти точках, результатом испытания считалось среднее значение. Очевидно, что большинство значений находится в диапазоне более 1000 МОм, следовательно, материалы можно отнести к категории «изолирующих». Образцы под № 34 (98 % полиэфир, 2 % проводящее карбоновое волокно) и № 41 (98% п/э, 2% антистатическая нить) – можно отнести к категории «рассеивающих» - электрическое сопротивление составляет от 100 кОм до 1000 МОм. Образцы № 33 (100% пара-арамидное волокно) и № 35 (99% полиэфир, 1% проводящее

карбоновое волокно) – являются «проводящими» с электрическим сопротивлением до 100 кОм [100].

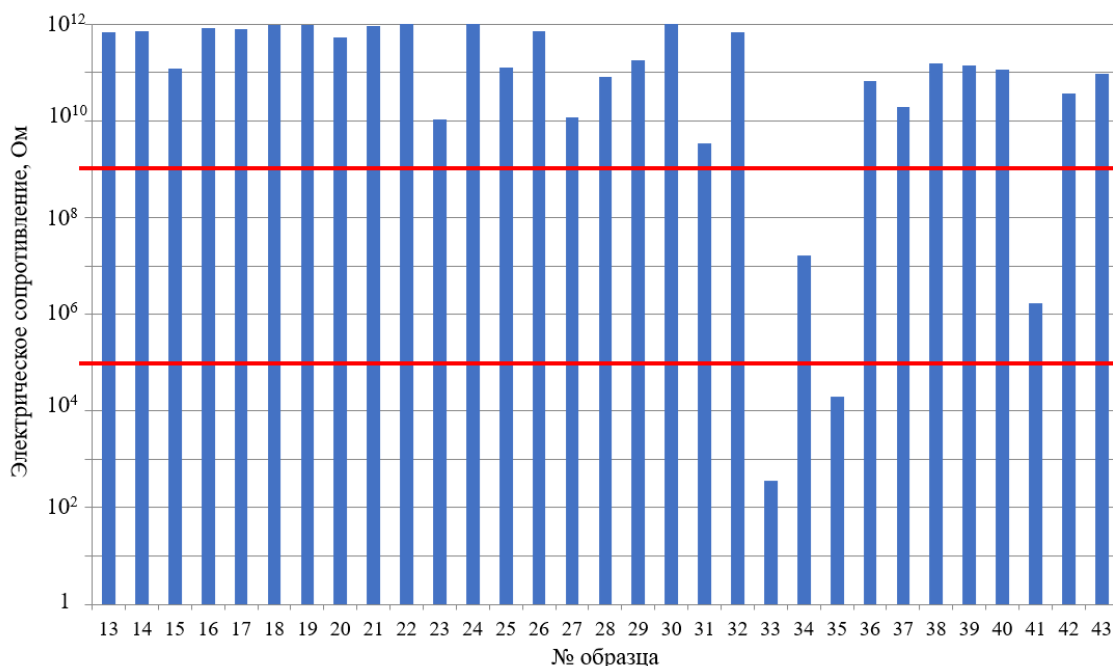


Рис. 3.9. Результаты измерения поверхностного электрического сопротивления образцов

Таким образом результаты исследования позволили выделить 3 группы материалов.

В первую группу вошли образцы под номерами 17, 21-22, 24, 30 – напряженность ЭСП на поверхности достаточно низкая, а электрическое сопротивление высокое, поэтому построить корреляционную зависимость не представляется возможным. Это можно объяснить схожестью химического состава образцов и ткани валика [100].

Вторую группу составили образцы № 23, 25, 27-29, 31, 33-38, 41-43, у которых как напряженность ЭСП, так и электрическое сопротивление имеют достаточно низкие значения.

В третью группу отнесены образцы № 13-16, 18-20, 32, 39-40, по значениям напряженности ЭСП и электрического сопротивления которых можно построить корреляцию. Результаты корреляционного анализа приведены на рис. 3.10.

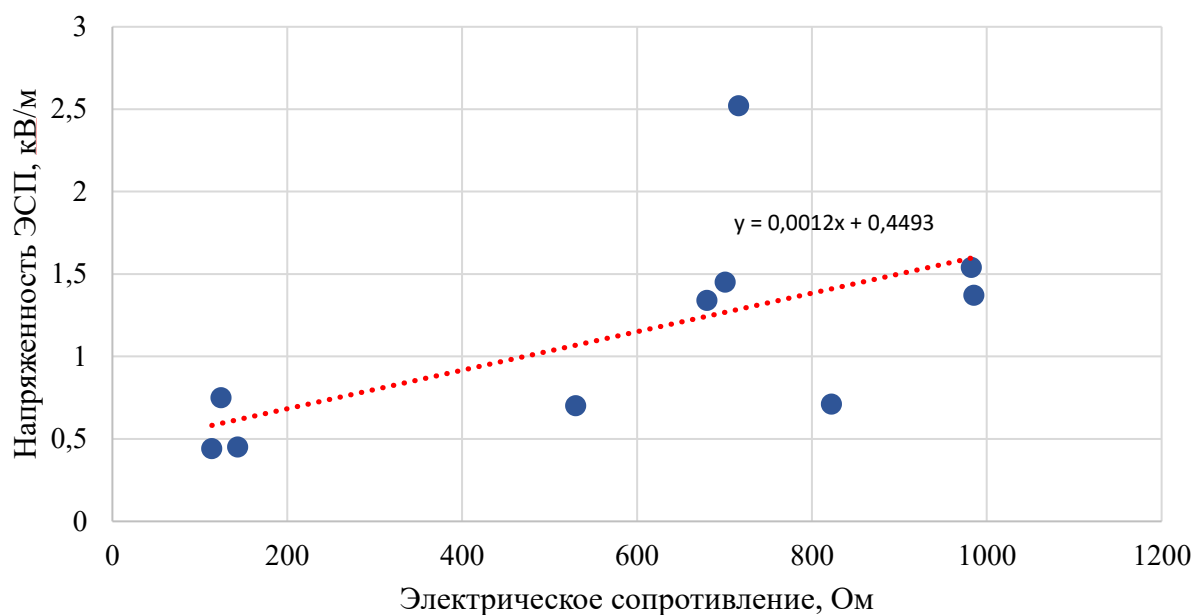


Рис. 3.10. Корреляционная зависимость напряжения ЭСП и электрического сопротивления образцов материалов стелек и подкладки верха обуви

На графике показана прямая положительная линейная зависимость между показателями, для которой коэффициенты корреляции Пирсона и Спирмена составили соответственно 0,6174 и 0,6970, т.е. теснота связи – средняя.

Таким образом, нами получены корреляционные зависимости для прогнозирования электростатических свойств материалов [100, 112]. Выявлено, что результаты измерения напряженности ЭСП и электрического сопротивления образцов стелечных и подкладочных материалов верха обуви допускают построение корреляционных зависимостей и, как следствие, прогнозирование антистатических свойств обувных материалов в соответствии с их составом. Полученные результаты позволяют рекомендовать материалы № 21-23 и 29 для производства антистатической обуви. Антистатические нити в их составе препятствуют накоплению статического электричества на поверхности материала, при этом риски возникновения искры сводятся к нулю [100].

3.1.4. Исследование электрического сопротивления и постоянной времени релаксации электростатического заряда обуви специального назначения

Универсальным способом заземления персонала является связка «обувь – напольное покрытие». Это более дорогостоящий вариант, чем индивидуальное заземление при помощи наручного браслета, но он обеспечивает непрерывное заземление при передвижении работника в зоне производственных помещений. Обувь при этом должна обладать нормированной проводимостью для стекания заряда с ноги на напольное покрытие. Многие национальные и международные стандарты рекомендуют начинать оснащение рабочей зоны с антистатического покрытия пола [66].

Проводящие и снимающие электростатический заряд полы – один из основных и важнейших элементов для функционирования в производственных зонах, защищенных от статического электричества. Система антистатических полов обеспечивает надежный контроль электростатического заряда, который накапливается при движении человека по полу. Напольное антистатическое покрытие значительно снижает или исключает возможность случайного электростатического разряда, который может повредить чувствительные электронные компоненты во время производства и хранения [66].

В настоящее время на рынке представлено несколько видов антистатических полов: покрытие из проводящей резины, линолеум, наливные полы, краска, коврики, как вариант покрытия небольшого заземленного участка.

Антистатическое покрытие в виде линолеума нуждается в специальной укладке, его необходимо монтировать на специальную медную ленту, которая заземляется через каждые 40 м². Антистатические покрытия должны полностью соответствовать закрепленным в нормативно-правовых актах [70] требованиям к полам помещений, защищенных от разрядов статического электричества. В РФ общая регламентация по созданию и использованию полов содержится в нормативном документе СП 29.13330-2011 «Полы» [117] (актуализация СНиП 2.03.13-88). Этот свод правил утвержден приказом Министерства регионального

развития Российской Федерации (Минрегион России) от 27 декабря N 785 [118] и действует с 20 мая 2011 года. Документ выполнен в рамках реализации принципов Федерального закона от 30 декабря 2009 г. N 384-ФЗ «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений» [119] и регламентирует проектирование полов производственных, складских, жилых, общественных, административных, спортивных и бытовых зданий. Приведем согласно этому нормативно-правовому акту дефиниции ключевых понятий:

- покрытие пола антистатическое – покрытие пола, сводящее к минимуму образование электрических зарядов на его поверхности в результате трения с другим материалом (колес тележек, транспорта или подошвы обуви), но электризуемое при соприкосновении с заряженными телами и воздействии ионизационного излучения;

- антистатичность пола – отсутствие накопления на покрытии пола статического электричества;

- безыскровость пола – отсутствие искрообразования на покрытии пола при ударах или волочении по нему металлических или каменных предметов, а также при разрядах статического электричества;

- покрытие пола электропроводное – покрытие пола, не электризуемое в результате трения с другим материалом (колес тележек, транспорта или подошвы обуви), а также при соприкосновении с заряженными телами и воздействии ионизационного излучения, но обладающее электрическим сопротивлением, меньшим, чем у переходного заземления технологического оборудования, что создает опасность удара электрическим током обслуживающего персонала;

- покрытие пола электрорассеивающее – покрытие пола, не электризуемое в результате трения с другим материалом (колес тележек, транспорта или подошвы обуви), а также при соприкосновении с заряженными телами и воздействии ионизационного излучения [66].

Пункт 4.17 правил предписывает, что «Требования по беспыльности, ровности, антистатичности и (или) безыскровости и другие специальные требования следует устанавливать на стадии технического задания на

проектирование с учетом особенностей технологического процесса». Он показывает значимость таких факторов как гашение статического заряда на стадии проектирования здания в соответствии с планируемой деятельностью.

Пунктом 5.11 устанавливается, что обеспечению комфортных условий для человека с точки зрения антистатичности и защиты электронного оборудования от электрических разрядов с напряжением более 5 кВ способствуют полы в помещениях жилых и общественных зданий с покрытием из полимерных антистатических материалов с удельным поверхностным электрическим сопротивлением в пределах $1 \cdot 10^6$ - $1 \cdot 10^9$ Ом. В свою очередь в помещениях промышленных зданий с требованием «электронной гигиены», в которых необходимо обеспечение комфортных условий для человека с точки зрения антистатичности, а также для защиты электронного оборудования от электрических разрядов с напряжением более 2 кВ полы должны выполняться с электрорассеивающим покрытием, характеризующимся величиной электросопротивления между поверхностью покрытия пола и системой заземления здания в пределах от $5 \cdot 10^4$ до 10^7 Ом [66].

Ранее затрагивался вопрос целесообразности антистатических напольных покрытий на производствах с повышенным риском взрывоопасности. Пункт 5.13 устанавливает, что полы в помещениях, где возможно образование взрывоопасных смесей газов, пыли, жидкостей и других веществ в концентрациях, при которых искры, возникающие при ударе предметов о пол или разрядах статического электричества, могут вызвать взрыв или возгорание, должны выполняться с электрорассеивающим покрытием из материалов, не генерирующих искр при ударных воздействиях, характеризующихся величиной электросопротивления между поверхностью покрытия пола и системой заземления здания в пределах от $5 \cdot 10^4$ до 10^6 Ом. В «чистых» и «особо чистых» помещениях этот показатель должен составлять от $5 \cdot 10^4$ до 10^7 Ом.

Также в своде правил установлено, что для отвода с поверхности покрытия пола статического электричества под электрорассеивающим покрытием пола должен быть размещен электроотводящий контур, присоединенный к системе

заземления здания.

В ГОСТ Р 53734.5.6-2021 [120] в числе общих требований к материалам напольных покрытий в производственных помещениях на участках, защищенных от электростатического разряда, устанавливается наличие поверхностного сопротивления и сопротивления относительно земли не более $1 \cdot 10^9$ Ом. Напольное покрытие должно обеспечивать общее сопротивление системы менее $1 \cdot 10^9$ Ом при напряжении тела человека менее 100 В по модели человеческого тела в случае применения системы заземления «обувь – сотрудник – пол» (ч. 5.3.2.6). Аналогичные требования установлены ч. 5.3.3.19 при невозможности выполнении всех производственных операций на одном рабочем месте (или для работы стоя), если иное не указано в конструкторской документации. Получается, что выполнение вышеупомянутого требования обеспечивается наличием напольного антистатически проводящего или рассеивающего покрытия и антистатической обуви. Периодичность проведения проверок на соответствие напольных покрытий определяют в плане выполнения программы электростатического разрядного управления, ч. 5.3.2.6 [66].

Поэтому в рамках нашего исследования мы проведем измерения электростатических свойств обувных конструкций, а затем перейдем к изучению системы «обувь – человек – напольное покрытие». Такой подход позволит получить более полное представление о электростатических взаимодействиях и их потенциальном влиянии на ЭСБ эксплуатации обуви в различных условиях.

Для решения поставленной задачи необходимо измерить электрическое сопротивление и постоянную времени релаксации ЭСЗ специальной обуви с различными материалами низа [66]. В случае специальной обуви, желательно, максимально быстрое стекание заряда, чтобы минимизировать риски.

Для измерения электрического сопротивление обуви применялся прибор VKG A-770, диапазон измерения которого составляет от 10 до 10^{14} Ом. Перед испытаниями образцы предварительно нормализовали при температуре (23 ± 2) °C и относительной влажности воздуха (50 ± 5) % в течение не менее 24 ч.

Постоянная времени релаксации электростатического заряда измерялась с помощью автоматизированной экспресс-методики, представленной в разделе 2.5

В качестве объектов исследования взяты образцы специальной обуви российских компаний с различными материалами низа. Всем моделям обуви для удобства присвоен номер и условное обозначение (табл. 3.5).

Табл. 3.5. Описания характеристик экспериментальных образцов обуви [66]

№ образца	Шифр образца	Фото	Конструктивно-технологическая характеристика модели
1	2	3	
1	ТЭП 1		Ботинки мужские с высокими берцами, клее-прошивного метода крепления. Материал низа - термоэластопласт. Материал верха – кожа хромового дубления.
2	ТЭП 2		Ботинки мужские с высокими берцами, клее-прошивного метода крепления. Материал низа – термоэластопласт. Материал верха – кожа хромового дубления.
3	ТЭП 3		Ботинки мужские с высокими берцами, клее-прошивного метода крепления. Материал низа – термоэластопласт. Материал верха – кожа хромового дубления.
4	ПУ/ТПУ 1		Ботинки мужские с высокими берцами, литьевого метода крепления. Материал низа – двуслойный полиуретан и термополиуретан, маслбензостойкий, антистатический. Материал верха – кожа хромового дубления.

1	2	3	4
5	ПУ/ТПУ 2		Ботинки мужские с высокими берцами, литьевого метода крепления. Материал низа – двуслойный термополиуретан, вспененный полиуретан, маслбензостойкий и кислотощелочестойкий. Материал верх – кожа (юфть) с защитными пропитками (ВО, МБС).
6	ПУ/ТПУ 3		Полусапоги мужские, литьевого метода крепления. Материал низа – двуслойный полиуретан и термополиуретан, маслбензостойкий, антистатический. Материал союзки – кожа хромового дубления, материал голенища – кирза.
7	С		Сапоги мужские с композитным подноском компрессионно-литьевого метода крепления с последующей вулканизацией. Материал низа – однослойная резина на основе нитрильного каучука (+300°C). Материал верха – кожа хромового дубления, текстиль.
8	Св		Сапоги мужские с композитным подноском литьевого метода крепления. Материал низа – двухслойная подошва, полиуретан и резина на основе нитрильного каучука (300°C / 60 с). Материал верха – кожа хромового дубления, текстиль.
9	Б		Ботинки мужские с композитным подноском компрессионно-литьевого метода крепления с последующей вулканизацией. Материал низа – однослойная резина на основе нитрильного каучука (+300°C). Материал верха – кожа хромового дубления, текстиль.

1	2	3	4
10	Бв		Ботинки мужские с композитным подноском литьевого метода крепления. Материал низа – двухслойная подошва, полиуретан и резина на основе нитрильного каучука (300°С / 60 с). Материал верха – кожа хромового дубления, текстиль.
11	Ан		Полуботинки женские для защиты от статического электричества клеевого метода крепления. Материал низа– полиуретан. Материал верха – кожа хромового дубления.

Типичные результаты исследования электрического сопротивления и постоянной времени релаксации электростатического заряда представлены на рис. 3.11. Измерения проводились в пяточной и носочной частях внутриобувного пространства. Очевидно, что показатели электрического сопротивления моделей № 4-5-6 находятся примерно в одном диапазоне – $5,0 - 8,0 \cdot 10^{10}$ Ом.

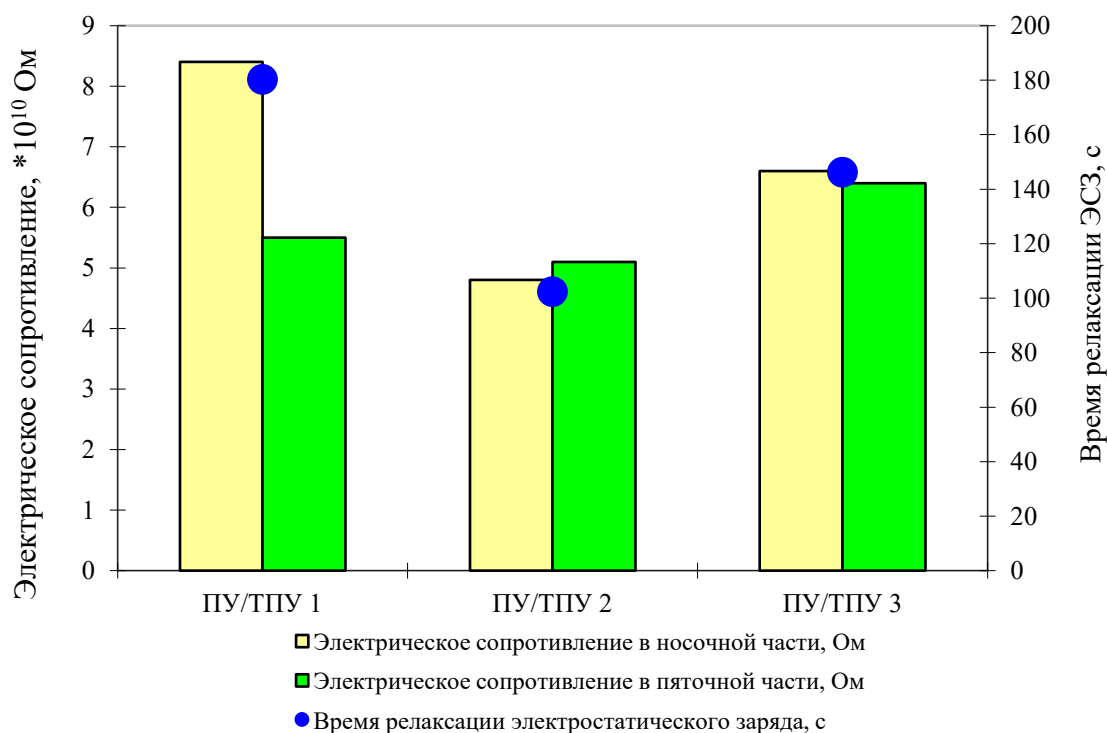


Рис. 3.11. Результаты испытаний специальной обуви моделей № 4-6 [66]

Некоторые различия между показателями электрического сопротивления в пяточной и носочной частях объясняются особенностями конструкции деталей низа обуви. Значения постоянной времени релаксации электростатических зарядов находятся в диапазоне от 100 до 180 с. Довольно широкий разброс данных можно объяснить тем, что во всех моделях обуви материалы низа отличаются композиционным составом, поскольку выпускаются различными компаниями.

Проведенные исследования по всем моделям обуви сведены в табл. 3.6.

Табл. 3.6. Показатели электрического сопротивления и времени релаксации электростатического заряда исследуемых образцов [66]

Шифр образца	Электрическое сопротивление, Ом		Время релаксации электростатического заряда, с
	в носочной части	в пяточной части	
ТЭП 1	$2,7 \cdot 10^{11}$	$3,4 \cdot 10^{11}$	241,2
ТЭП 2	$3,5 \cdot 10^{11}$	$4,1 \cdot 10^{11}$	145,6
1	2	3	4
ТЭП 3	$3,4 \cdot 10^{11}$	$2,9 \cdot 10^{11}$	115,7
ПУ/ТПУ 1	$8,4 \cdot 10^{10}$	$5,5 \cdot 10^{10}$	180,3
ПУ/ТПУ 2	$4,8 \cdot 10^{10}$	$5,1 \cdot 10^{10}$	102,4
ПУ/ТПУ 3	$6,6 \cdot 10^{10}$	$6,4 \cdot 10^{10}$	146,2
С	$2,8 \cdot 10^{11}$	$2,9 \cdot 10^{11}$	230,3
Св	$1,5 \cdot 10^{11}$	$1,5 \cdot 10^{11}$	180,5
Б	$1,1 \cdot 10^{11}$	$1,2 \cdot 10^{11}$	240,2
Бв	$3,7 \cdot 10^{11}$	$3,9 \cdot 10^{11}$	190,1
Ан	$3,5 \cdot 10^7$	$3,5 \cdot 10^7$	105,6

Из 11 образцов только образец Ан подтвердил свои антистатические свойства – электрическое сопротивление находится в диапазоне 10^7 Ом. Образцы ПУ/ТПУ 1 и ПУ/ТПУ 3 не проходят по нормам электростатической безопасности – электрическое сопротивление составляет 10^{10} Ом, хотя в описании модели указано, что материалы низа являются антистатическими. При этом стоит отметить, что постоянная времени релаксации электростатического заряда у всех исследуемых

образцов составила более 100 секунд, что не соответствует нормам электростатической безопасности для специальной обуви.

Согласно ГОСТ 12.4.124-83 [11], показатель постоянной времени релаксации электростатического заряда общей предварительной антистатической защиты должен быть не более 2 секунд. Это означает, что заряд, накопленный на обуви, должен рассеиваться до безопасного уровня в течение этого времени при контакте с землей. Таким образом, показатель постоянного времени релаксации заряда является одним из основных параметров, определяющих эффективность антистатической защиты специальной обуви.

Придя к выводу, что целесообразно исследовать обувные конструкции в связке с напольным покрытием, нами проведены испытания нескольких систем (рис. 3.12):

- отдельно специальная обувь (Ro);
- «специальная обувь – человек – точка заземления» (Ro-ч-тз);
- «специальная обувь – человек – напольное покрытие» (Ro-ч-нп);
- «специальная обувь – человек – антистатическое напольное покрытие» (Ro-ч-анп).



Рис. 3.12. Системы измерения [66]

В качестве напольных покрытий выбраны линолеум гетерогенный

коммерческий «Terracotta 01» и линолеум каландрированный антистатический «1000 3», смонтированный на специальную медную ленту с заземлением.

Результаты показали, что все испытанные системы превышают антистатический диапазон электрического сопротивления на 1, 2 и 3 порядка. Для наглядности результаты измерения всех систем на рис. 3.13 представлены относительно диапазона 10^9 Ом.

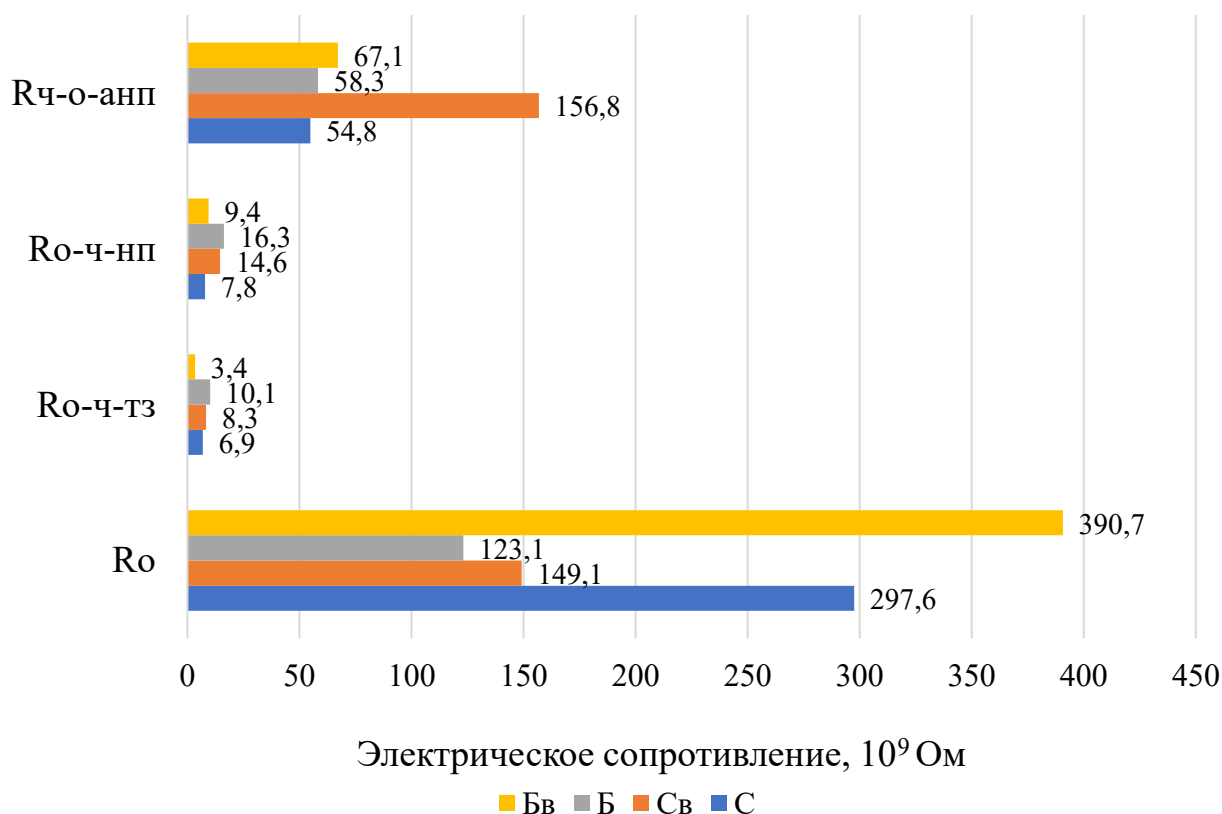


Рис. 3.13. Сравнение значений электрического сопротивления всех систем [66]

На основе полученных данных можно сделать следующие выводы:

- максимальные значения электрического сопротивления - от $123 \cdot 10^9$ до $390 \cdot 10^9$ Ом или $1,2 \cdot 10^{11}$ до $3,9 \cdot 10^{11}$ Ом – получены при исследовании специальной обуви без привязки к системе «человек-напольное покрытие». Большие значения измеряемого показателя объясняются тем, что исследуемые модели № 7-10 не являются специальной обувью с защитными антистатическими свойствами, электрическое сопротивление обуви высокое из-за изоляционных свойств материалов низа, которые ограничивают стекание электрического заряда;

- минимальные значения – $3,4 \cdot 10^9$ – $10,1 \cdot 10^9$ – в системе «специальная обувь-человек-точка заземления», что объяснимо так как на этой связке и основана ЭСБ человека, который перемещается в производственной среде;

- значения от $54,8 \cdot 10^9$ – $156,8 \cdot 10^9$ Ом или $0,5 \cdot 10^{11}$ – $1,6 \cdot 10^{11}$ Ом, получены при измерении системы «специальная обувь-человек-антистатическое напольное покрытие». Антистатический каландрированный линолеум обладает специальными свойствами, которые помогают уменьшить накопление статического заряда, это достигается за счет специальных антистатических присадок в линолеум. Но при этом обувь, особенно с высоким электрическим сопротивлением материалов низа, может создавать большее электрическое сопротивление на такой поверхности из-за хорошей изоляции, что приведет к более высоким показателям электрического сопротивления;

- значения от $9,4 \cdot 10^9$ до $16,3 \cdot 10^9$ Ом, полученные при измерении системы «специальная обувь-человек-напольное покрытие», могут объясняться тем, что именно он показал наименьшие показатели постоянной времени релаксации в предыдущих испытаниях. Коммерческий гетерогенный линолеум состоит из нескольких слоев различных материалов, которые имеют более высокую проводимость, чем материалы, используемые в антистатическом линолеуме.

Проведены измерения электрического сопротивления и постоянной времени релаксации электростатического заряда образцов специальной обуви, среди которых 3 образца маркировались как обувь защитная от статического электричества. На основе полученных данных можно сделать вывод, что только одна модель обуви № 11 попадает в ранг антистатической обуви в классификации обуви по диапазонам электрического сопротивления (см. рис. 1.1) – электрическое сопротивление находится в диапазоне от 10^6 до 10^8 Ом [66].

Необходимо отметить, что измерение электрического сопротивления подошвы обуви и используемых для её изготовления материалов является критически важным в обеспечении антистатической безопасности. Показано, что электростатическая безопасность обуви напрямую связана с материалами, используемыми в конструкции низа. Правильный выбор и тщательное

тестирование материалов антистатической обуви минимизируют риски накопления статического электричества и последующего возникновения искр, которые могут повредить оборудование или создать опасные для пользователей условия.

На основании полученных данных можно выделить несколько рекомендаций. Во-первых, необходимо более строгое соблюдение стандартов и нормативных актов при разработке и производстве специальной антистатической обуви, чтобы гарантировать, что все образцы отвечают требованиям электростатической безопасности. Во-вторых, предписывается регулярное проведение испытаний электростатических свойств не только обуви, но и напольных покрытий, поскольку система «обувь – человек – напольное покрытие» играет ключевую роль в создании безопасной рабочей среды.

Кроме того, привлекательна возможность разработки специальной программы регулярного контроля и мониторинга антистатических свойств обуви, а также обучения работников основам ЭСБ и необходимости соблюдения соответствующих норм при выполнении ими функциональных обязанностей в потенциально взрывоопасных зонах. Такие меры могут значительно снизить риск возникновения статических разрядов и эвентуального ущерба как для оборудования, так и здоровья персонала.

3.2. Разработка математической модели электризации человека в системе «обувь - человек - напольное покрытие»

Проведенные в работе экспериментальные исследования антистатических параметров обуви: оценка различных компонентов обуви, таких как подошва, наружные детали верха, подкладка и т.д., для определения их электростатических характеристик, а также конструктивные испытания – оценка интеграции материалов в конструкции обуви и их влияние на общие электростатические свойства, сопряжены со значительными затратами времени, бюджета и материалов. Сократить эти расходы позволяет моделирование, которое, прежде чем проводить

реальные испытания, допускает расчет и тестирование различных сценариев в виртуальной среде.

Моделирование предполагает более детальное изучение физических процессов, протекающих в материалах и конструкциях обуви, что может быть сложно достичь исключительно экспериментально. Понимание взаимодействия различных факторов открывает возможности прогнозирования поведения системы без множества физических испытаний.

При этом моделирование полезно для прогнозирования поведения сложных систем или материалов в экстремальных условиях без физического воздействия на них. Переход от экспериментальных методов к моделированию обусловлен факторами, связанными с эффективностью, безопасностью, экономией времени и ресурсов, а также получением более точных и детализированных данных.

Например, в электронике моделирование ЭСП способствует проектированию и оптимизации электронных устройств, таких как микрочипы, транзисторы и диоды [312, 313, 314]. В медицине моделирование ЭСП используется для изучения воздействия электрических полей на ткани и органы человека, что помогает в разработке новых методов лечения. Моделирование ЭСП в нефтегазоперерабатывающей отрасли практикуется для определения воздействия электростатических разрядов, с целью выявления оптимального расположения заземляющих элементов для снижения до безопасных величин напряженности ЭСП [315, 316, 328]. Кроме того, моделирование для изучения влияния электростатических разрядов на окружающую среду способствует разработке мер по предотвращению негативных последствий [327].

Современная вычислительная техника заметно облегчила процессы проектирования и исследования различных конструкций с использованием программ CAD-систем на основе CAD - Computer-Aided Design и CAE - Computer-Aided Engineering, а также моделирования разнообразных физических процессов - CAE-систем. Синергия программных пакетов очевидна.

Одним из методов моделирования является метод конечных элементов (МКЭ), который применяется для решения дифференциальных уравнений с

частными производными, а также интегральных уравнений, возникающих при решении задач прикладной физики. Он используется для моделирования различных конструкций, устройств и процессов во всех областях инженерных, производственных и научных исследований. МКЭ позволяет рассматривать целостную конструкцию как множество отдельных конечных элементов и проводить исследования технических характеристик проектируемых объектов без необходимости создания экспериментальных образцов и дорогостоящих натурных исследований [327]. Среда разработки моделей позволяет пройти все этапы – от построения геометрической модели, задания свойств материалов и описания физики задачи до решения и визуализации результатов моделирования.

По сравнению с проведением физических экспериментов и испытанием прототипов моделирование, совмещённое с эмпирическими техниками, позволяет быстрее, эффективнее и точнее оптимизировать процессы и устройства.

Для решения задач расчета электростатических полей разработан широкий спектр программных продуктов, включающий как универсальные, так и узкоспециализированные пакеты. В промышленности широкое применение находит коммерческое программное обеспечение (ANSYS Fluent, Star-CCM+, FloTHERM, COMSOL Multiphysics, PHOENICS, FLOW-3D и другие) [317-321], однако его стоимость может составлять десятки и сотни тысяч долларов, без учета стоимости распараллеливания кода.

Для моделирования МКЭ нами использовано ПО COMSOL Multiphysics [318], которое применяется для решения сложных прикладных задач, включающих в себя несколько физических явлений, таких как механика, теплообмен, акустика, электромагнетизм (в том числе и расчет электрических полей) и др. Предварительное моделирование процессов, связанных с накоплением статического электричества на человеке, позволяет эффективнее планировать экспериментальные исследования, сократить их объем, оперативнее и точнее решать практические задачи, связанные с оценкой электростатической безопасности [327].

Накопленные исследования позволили нам сформировать алгоритм расчетной оценки ЭСБ обуви, состоящий из 4 этапов, выполнение которых позволит проводить детальную и точную оценку ЭСБ человека и внедрять необходимые меры для её улучшения. Алгоритм базируется на математических моделях и методах (рис. 3.14).

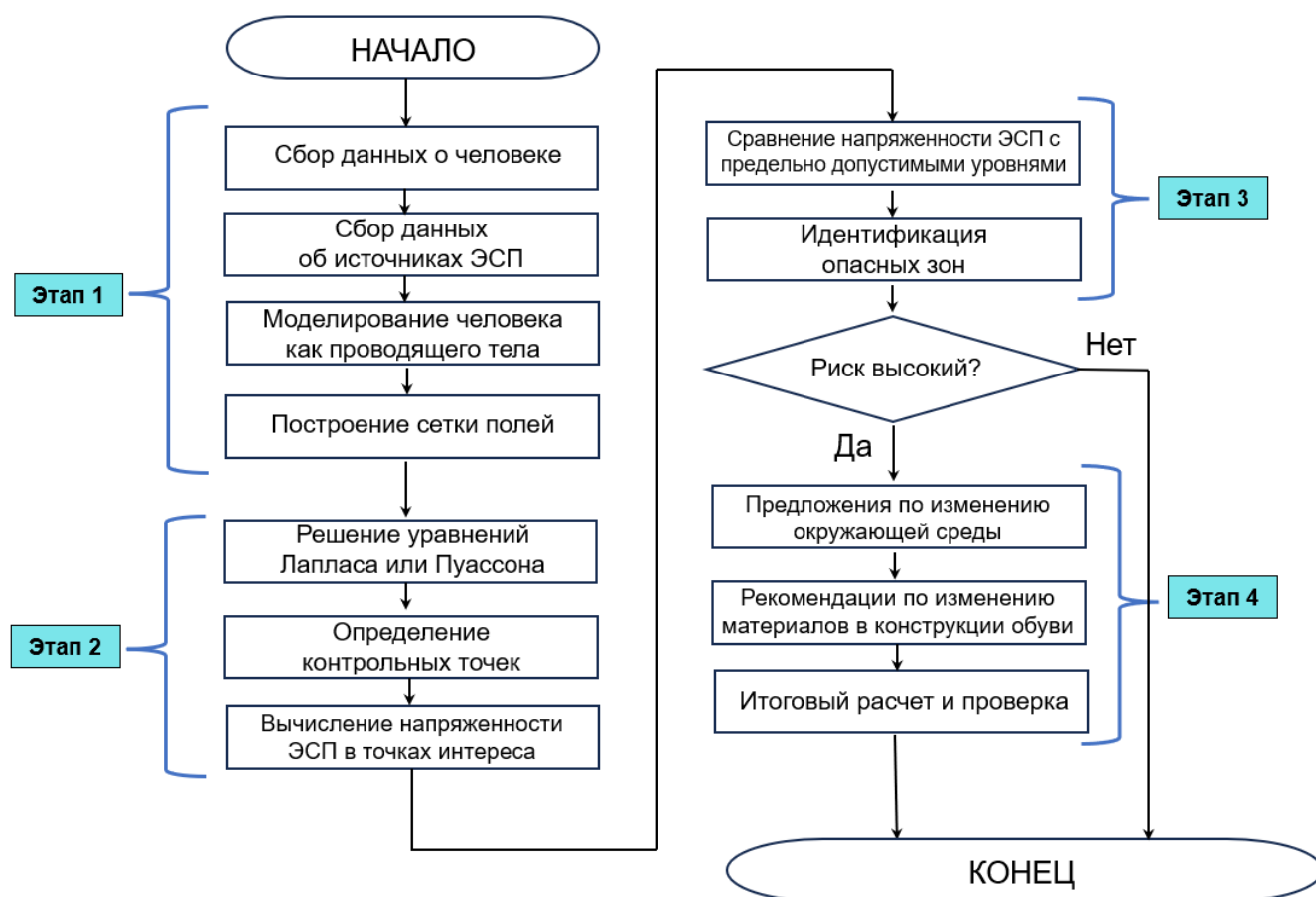


Рис. 3.14. Алгоритм расчетной оценки ЭСБ

Рассмотрим алгоритм более подробно:

Этап 1. Подготовка исходных данных

1. Сбор данных о человеке:
 - геометрические параметры тела (рост, окружность груди, талии и т.д.);
 - материал одежды и его диэлектрические свойства;
 - положение относительно источников ЭСП.
2. Сбор данных об источниках ЭСП:

- местоположение источников (оборудование, мебель, поверхности и пр.);
- потенциал источников;
- характеристики окружающей среды (влажность, температура и т.д.).

3. Моделирование человека как проводящего тела

- представить человека как систему проводящих сегментов, аналогичных цилиндрам или эллипсоидам, с конкретными размерными параметрами.

4. Построение сетки полей

- построить трехмерную сетку с учетом размеров человека и источников полей.
- установить граничные условия на поверхности элементов сетки.

Этап 2. Решение уравнений и расчет напряженности ЭСП

1. Решение уравнений Лапласа или Пуассона

- используются МКЭ или конечных разностей для нахождения потенциала и напряженности ЭСП в каждом узле сетки.

2. Определение контрольных точек:

- выбрать ключевые точки на поверхности тела и рядом с источниками для детального анализа.

3. Вычисление напряженности ЭСП в точках интереса:

- рассчитать напряженность ЭСП в каждой контрольной точке на основе данных моделирования.

Этап 3. Определение уровня ЭСБ системы

1. Сравнение напряженности ЭСП с предельно допустимыми уровнями:

- сравнить полученные значения напряженности ЭСП с установленными нормативами ЭСБ.

2. Идентификация опасных зон:

- определить области вокруг человека и на его теле, где напряженность превышает безопасные пределы.

Этап 4. Рекомендации по снижению риска

1. Предложения по изменению окружающей среды:

- изменение расположения источников ЭСП;

- установка заземления и экранирующих материалов.
- 2. Рекомендации по изменению поведения и среды:
 - изменения в конструкции обуви или одежде (использование антистатических материалов);
 - повышение влажности в помещении;
 - использование антистатических напольных покрытий и других защитных средств.
- 3. Итоговый расчет и проверка
 - провести повторный расчет после внедрения рекомендаций, чтобы убедиться в эффективности мер по снижению ЭСП;
 - оформить полный отчет с описанием проведенных расчетов, выявленных рисков и предложенных мер по обеспечению ЭСБ.

Пример выполнения:

1. Анкетирование человека и сбор данных о рабочем месте.
2. Составление 3D-модели человека и окружения.
3. Разбивка области на сетку и наложение граничных условий.
4. Расчет напряженности с использованием программного обеспечения для моделирования электромагнитных полей.
5. Анализ результатов и выявление зон повышенной напряженности.
6. Предложение и внедрение мер безопасности, таких как заземляющие браслеты, изменение рабочего пространства и другие.
7. Пересчет и итоговая проверка изменений.

Таким образом, выполнение предписанных этапов позволит проводить детальную и точную оценку электростатической безопасности вокруг человека и внедрять необходимые меры для её улучшения.

Используемая нами среда COMSOL Multiphysics моделирует влияние ESD-разряда и предоставляет возможность [322]:

- предусмотреть ухудшение качества материалов в связи с электростатическим и электромагнитным излучением на основе анализа

распределения заряда – когда, где и как возникнет пробой с возникновением электрической дуги;

- прогнозировать накопления заряда на сложном техническом оборудовании в условиях невозможности проведения реального моделирования (на спутниках, космических платформах и т.д.)

- моделировать последствия электростатических разрядов в воздухе и твёрдых диэлектриках.

Проведем оценку работоспособности ПО для нашей задачи в явном виде: металлический шар радиусом $R = 0,2$ м окружен слоем диэлектрика толщиной $d = 0,01$ м с диэлектрической проницаемостью $\epsilon = 4$. Моделирование напряженности ЭСП для случая, когда потенциал шара соответствует 10 кВ представлен на рис. 3.15 и 3.16.

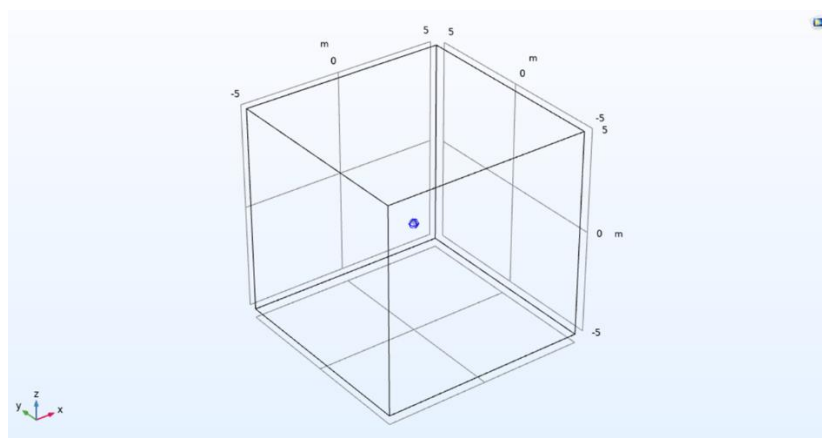


Рис. 3.15. Геометрия задачи

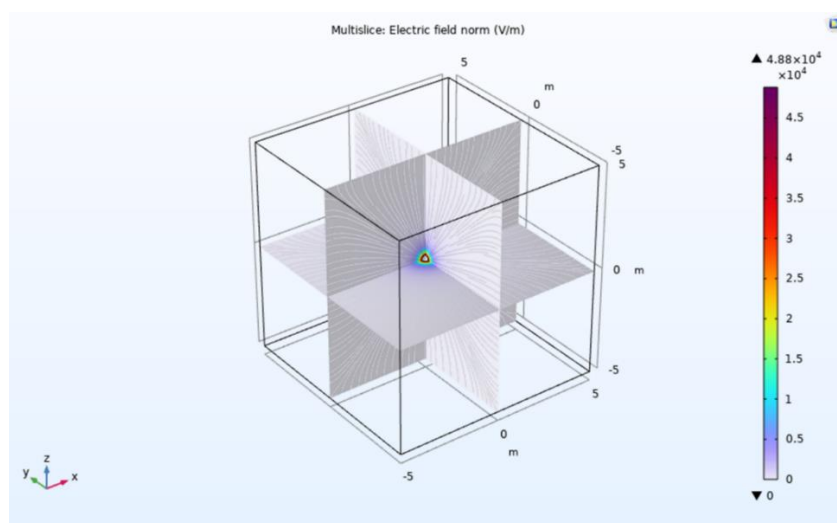


Рис. 3.16. Объемное распределение напряжённости ЭСП

Распределение напряженности ЭСП по сечению металлического шара показывает (рис. 3.17), что напряженность уменьшается по мере удаления от его поверхности и достигает минимального значения на границе диэлектрического слоя.

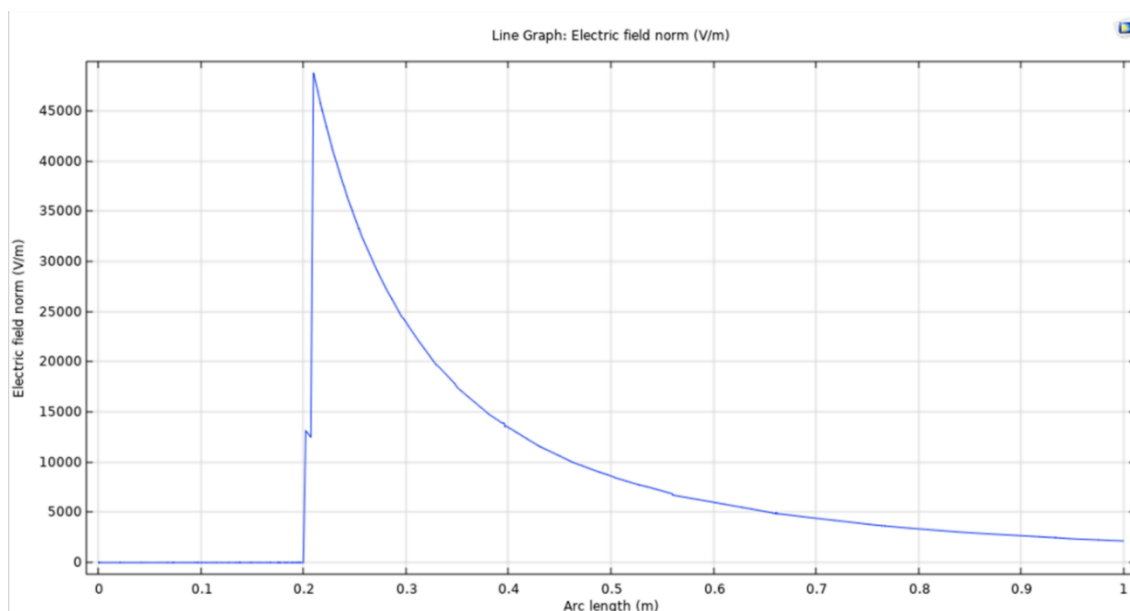


Рис. 3.17. Распределение напряжённости ЭСП по сечению шара

Внутри диэлектрика наблюдается постепенное снижение напряженности, обусловленное его диэлектрической проницаемостью $\varepsilon = 4$. Такое поведение напряженности ЭСП демонстрирует влияние диэлектрического материала на распределение электрического поля вокруг заряженного предмета.

По разработанному алгоритму проведено моделирования методом конечных элементов в ПО COMSOL Multiphysics для определения взаимосвязи накопления электростатических зарядов на теле человека от электрического потенциала, наличия обуви и одежды различной диэлектрической проницаемости. Для начала задаются: геометрия тела, толщина элементов одежды на теле и диэлектрическая проницаемость материалов, потенциал на теле человека и др.

Основная цель – разработка моделей, которые отражают корреляцию между ЭСП и потенциалом тела человека в системе «специальная обувь-человек-напольное покрытие». Ведущими параметрами, характеризующими ЭСП зарядов, являются напряженность ЭСП и потенциалы его отдельных точек [327].

В науке об электричестве для краткости и инвариантности (независимости от системы координат) математические соотношения удобно описывать векторным дифференциальным оператором «набла», который в декартовых координатах определяется выражением:

$$\nabla = [\mathbf{e}_x \frac{\partial}{\partial x}, \mathbf{e}_y \frac{\partial}{\partial y}, \mathbf{e}_z \frac{\partial}{\partial z}] \quad (3.2)$$

Действия с ним подчиняются правилам работы с вектором-строкой и операциями дифференцирования в частных производных.

Между неподвижными электрическими зарядами в пространстве существует электрическое поле, что подтверждается силой, действующей на заряд, помещенный в любую точку $\mathbf{r}$ пространства.

Физическое электрическое поле описывают математическими полями напряженности и потенциала. Векторное поле напряженности $\mathbf{E}(\mathbf{r})$ в точке $\mathbf{r}$ пространства равно силе, действующей в этой точке на единичный положительный заряд со стороны электрического поля. Величина этой электрической силы пропорциональна величине заряда q : $\mathbf{F}(\mathbf{r}) = q \mathbf{E}(\mathbf{r})$.

Векторное поле напряженности является потенциальным. Это означает, что существует поле скалярной функции $\varphi(\mathbf{r})$, градиент которой равен напряженности: $\nabla \cdot \varphi(\mathbf{r}) = \mathbf{E}(\mathbf{r})$. Функцию $\varphi(\mathbf{r})$ называют полем потенциала электрического поля.

Потенциал поля определен с точностью до аддитивной константы. Физический смысл имеет только разность потенциалов в каких-либо двух точках электрического поля $U_{12} = \varphi(\mathbf{r}_2) - \varphi(\mathbf{r}_1)$, которую называют напряжением электрического поля между точками $\mathbf{r}_2$ и $\mathbf{r}_1$.

Электрическое поле подчиняется правилу суперпозиции: поле в некоторой точке пространства равно сумме полей, создаваемых каждым зарядом. Поля напряженности складываются по правилу векторов, поля потенциалов – как скалярные величины с учетом знака.

Материальная среда в зависимости от физической природы и состояния может не препятствовать движению электрических зарядов, полностью

препятствовать или препятствовать частично. В первом случае материальную среду называют проводником, во втором – диэлектриком, в третьем – полупроводником. Вид проводимости среды зависит от ее атомарно - молекулярной структуры и термодинамического состояния и может меняться при изменении структуры или температуры.

В проводящей среде заряды силами отталкивания между зарядами с одинаковым знаком распределяются по поверхности проводника. Поэтому электрическое поле внутри проводящей среды отсутствует.

В вакууме связь между напряженностью электрического поля вокруг проводника с зарядами на поверхности проводника или распределенными в вакууме описывается уравнением $\langle \nabla, \mathbf{E}(\mathbf{r}) \rangle = q(\mathbf{r})$. Здесь треугольные скобки означают операцию скалярного произведения векторов внутри скобок. В области пространства, в которой отсутствуют заряды, электрическое поле может существовать благодаря зарядам, расположенным вне этой области.

В диэлектрической среде внешние заряды (на границе среды) приводят к поляризации ее внутренних зарядов. Эта поляризация приводит к появлению собственного поля зарядов поляризации, которое всегда направлено против поля внешних зарядов и частично или полностью экранирует внешнее поле.

Для описания поля в материальной среде вводят поле электрической индукции $\mathbf{D}$. Оно связано с напряженностью электрического поля множителем ϵ – диэлектрической проницаемостью среды $\mathbf{D} = \epsilon \cdot \mathbf{E}$.

Размерность электрических величин зависит от выбранной системы единиц. Чтобы отличать электрические свойства диэлектрической среды от вакуума, связь между полями индукции и напряженности записывают в виде $\mathbf{D} = \epsilon_m \cdot \epsilon_0 \cdot \mathbf{E}$, где ϵ_0 – диэлектрическая проницаемость вакуума, $\epsilon_m = \epsilon / \epsilon_0$ – относительная диэлектрическая проницаемость среды. В табл. 3.7 приведены значения ϵ_m для некоторых материалов.

Табл. 3.7. Показатели относительной диэлектрической проницаемости некоторых материалов

Вещество	ε_m	Вещество	ε_m
Воздух, 0°C	1,0006	Стеатит	6.25
Вода дистилл.	81,1	Слюда	5 – 6
Спирт этил.	25,8	Парафин	2.2
Кварц плавл.	3,8	Полистирол	2.5
Стекло	3 – 10	Полиэтилен	2.25
Титанат бария	$\sim 10^4$	Тефлон	2.1

Для плоскостного 2D-моделирования интерфейс COMSOL Multiphysics предполагает симметрию, при которой электрический потенциал изменяется только в направлениях x и y и постоянен в направлении z [327]. Это означает, что электрическое поле E касается плоскости xy . При такой симметрии решается то же уравнение, что и в трехмерном случае. Модуль «Электростатика» COMSOL Multiphysics позволяет создавать модели электростатических систем с различными одномерными комбинациями, двумерных оболочек и трехмерных тел. Модели полей, рассчитанных на основе МКЭ, можно визуализировать графиками сечений, контурными графиками, графиками изоповерхностей, силовыми линиями, стрелочными диаграммами и т.д. Для обработки результатов используется объёмная конечно-элементная сетка, при условии, что все модели имеют постоянные и изотропные свойства материала. Для электростатических расчетов, во всех рассматриваемых моделях должна быть постоянной и относительная диэлектрическая проницаемость. При этом можно создавать модели, содержащие несколько областей с различной диэлектрической проницаемостью. Выбраны параметры для моделирования: в помещении размерами $5 \times 5 \times 3 \text{ м}^3$ находится человек ростом 170 см (вертикальная ось – 170 см, горизонтальная ось – 60-70 см), пол заземлен, а тело человека является проводником, обувь с относительной диэлектрической проницаемостью $\varepsilon = 3,5$, потенциал на человеке варьируется от 0,1 до 30 кВ [327]. Рассмотрены три вида моделей (табл. 3.8).

Табл. 3.8. Виды моделей

Номер модели	Наличие одежды/обуви	Диэлектрическая проницаемость материала	Усредненная толщина слоя одежды, см
1	без одежды, в обуви	-	-
2	в легкой одежде, в обуви	2,4	0,5
3	в легкой и теплой одежде, в обуви	4,3	2,0 – 2,5

На рис. 3.18 показано нарастание электростатического разряда на человеке, которое начинает развиваться с ног.

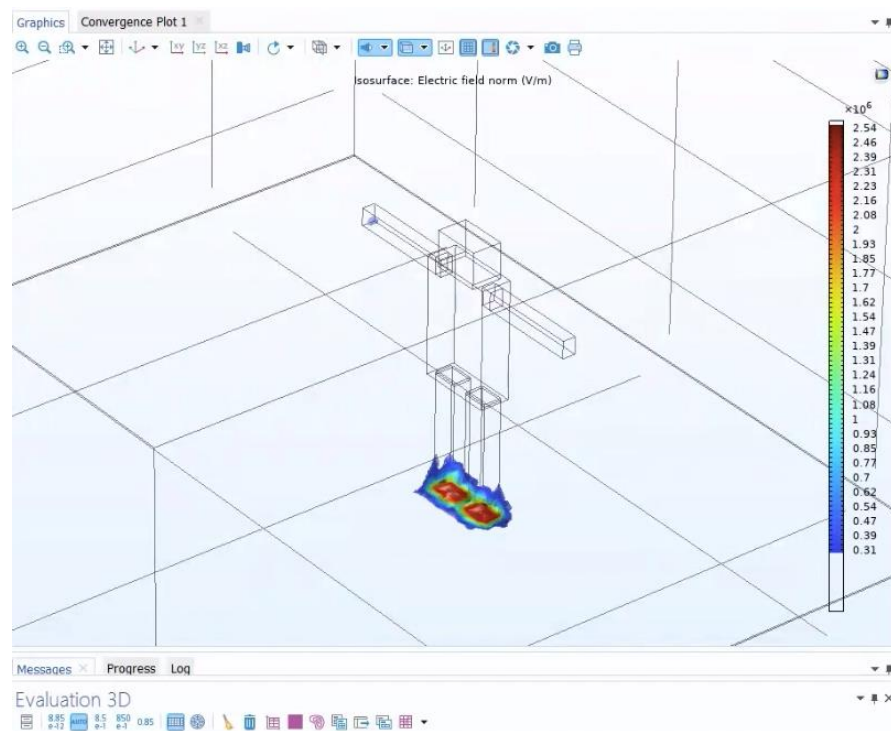


Рис. 3.18. Моделирование нарастания электростатического разряда на человеке в COMSOL Multiphysics

На рис. 3.19 показано распределение электростатического разряда по всей поверхности тела человека: красные зоны - максимальный заряд – до $2,02 \cdot 10^6$ В/м; синие – минимальный – до $0,18 \cdot 10^6$ В/м.

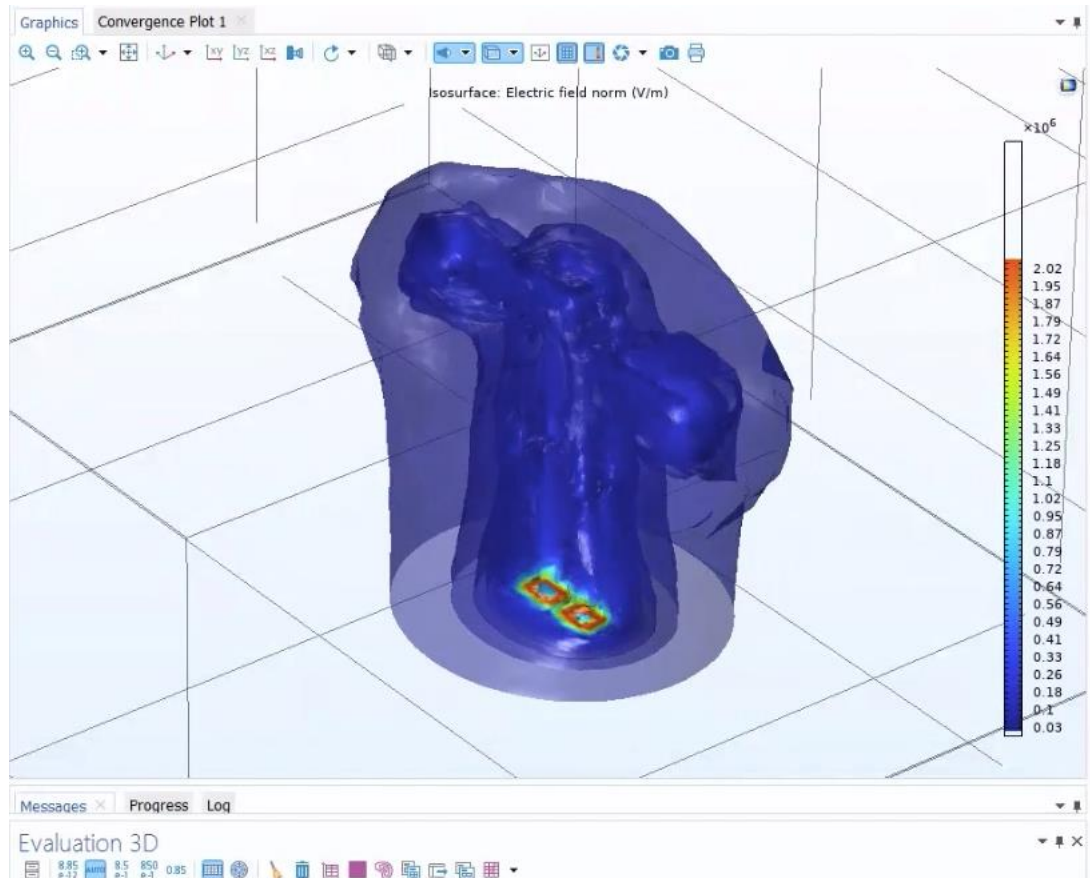


Рис. 3.19. Визуализация распределения электростатического разряда на человеке в COMSOL Multiphysics

Рассмотрено три варианта положения тела человека: руки опущены вдоль тела; одна рука вытянута в пространство, рука вытянута в сторону заземленного оборудования (рис. 3.20, а, б, в).

Типичные результаты моделирования на примере модели № 2 представлены на рис. 3.21. Идентификация конкретных значений ЭСП соответствует цветовой шкале. Показано, что рост потенциала на теле человека приводит к неоднородному локальному увеличению значений напряженности ЭСП, которое обусловлено геометрией системы «специальная обувь-человек-напольное покрытие».

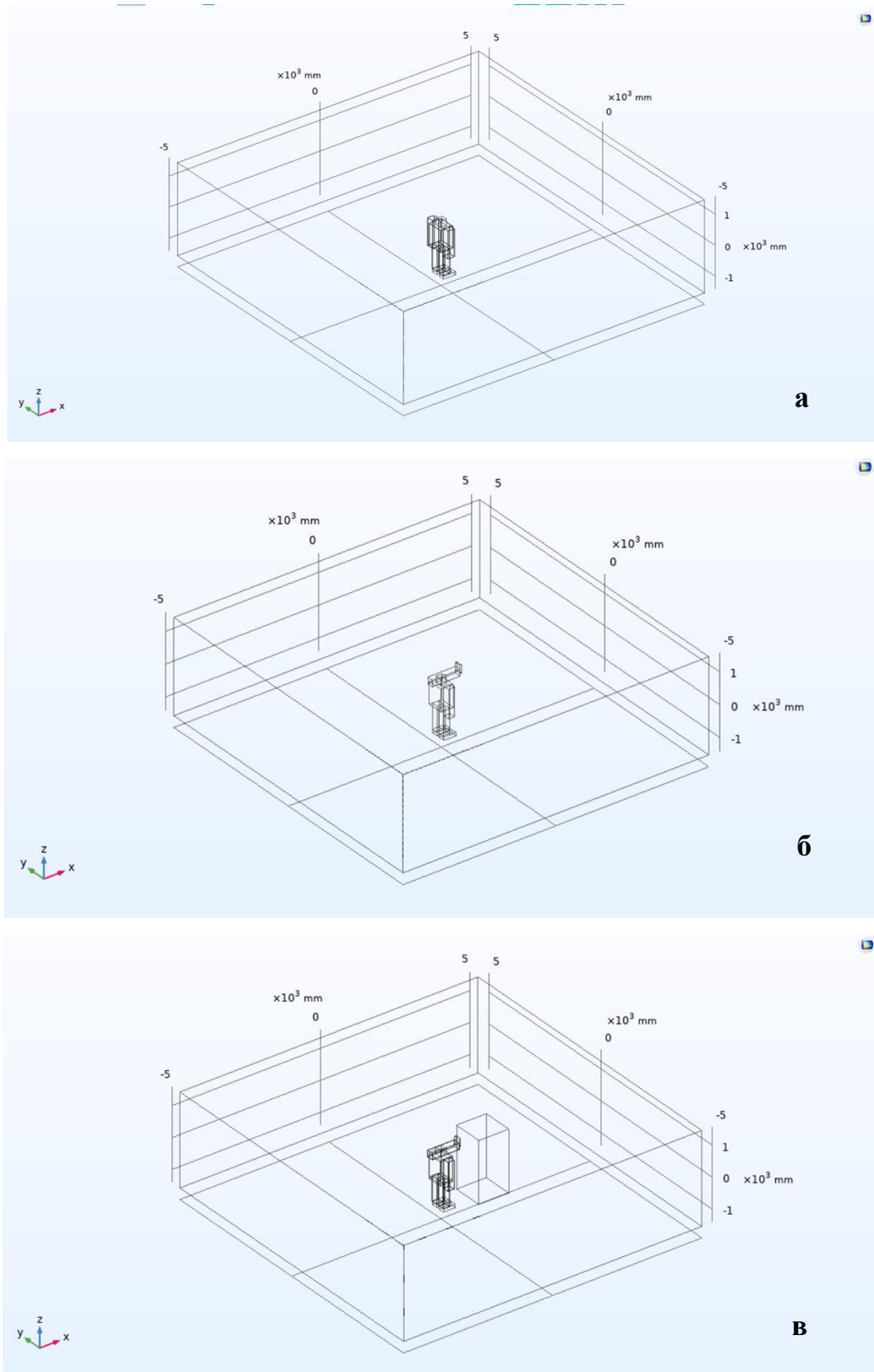


Рис. 3.20. Геометрия задачи, 3 варианта положения тела человека:
 а - руки опущены вдоль тела; б - одна рука вытянута в пространство; в - рука вытянута в сторону заземленного оборудования

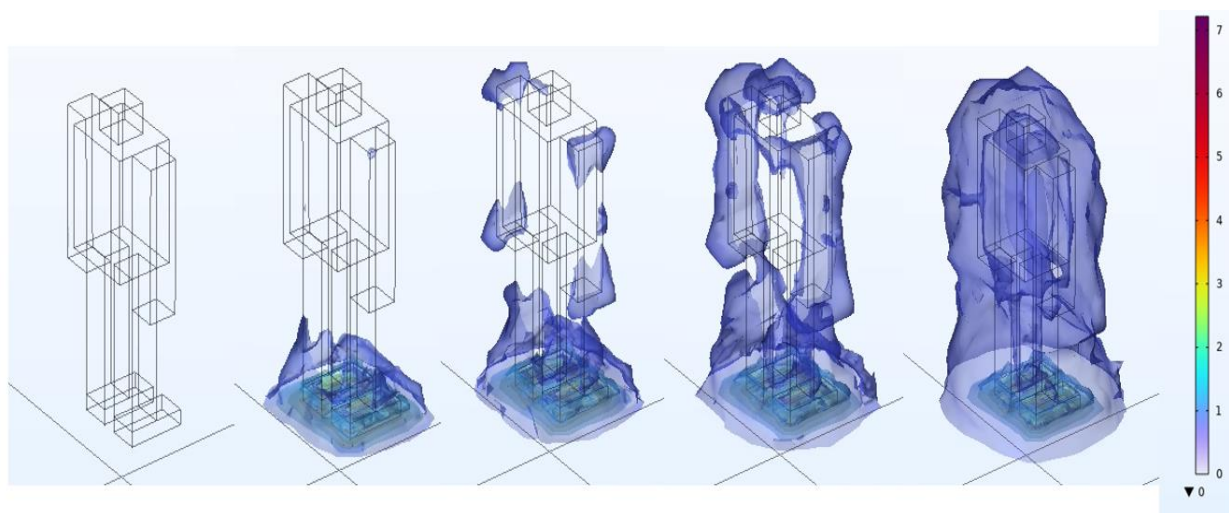
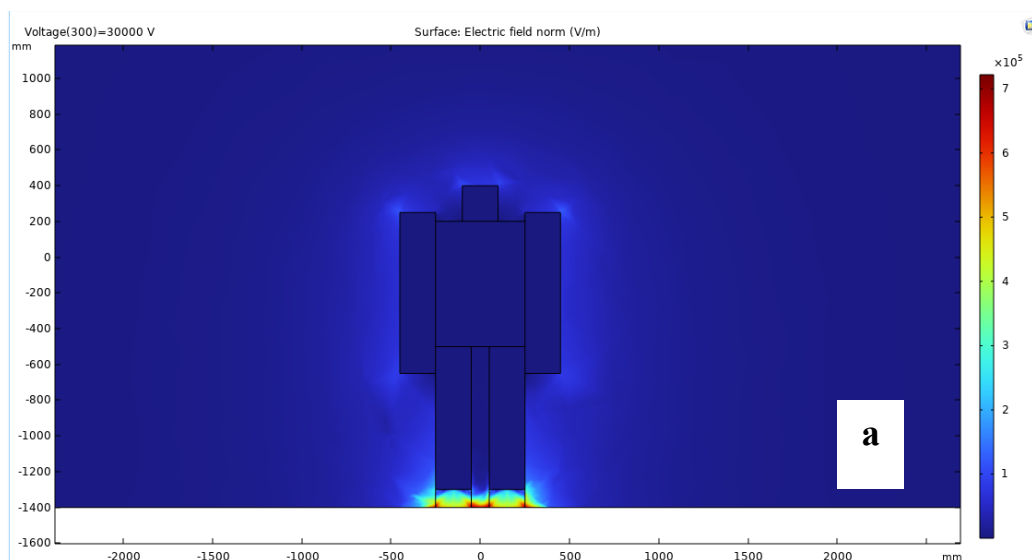


Рис. 3.21. Визуализация нарастание напряженности электростатического поля (кВ/м) при увеличении потенциала (кВ) на теле человека

При вычислениях с использованием параметров Модели № 1 (рис. 3.22, а, б, в) получены следующие результаты – ЭСП системы «специальная обувь-человек-напольное покрытие» максимально концентрируется в нижней части геометрии тела, т.е. в области обуви, в положении рук вдоль тела, а также, когда одна рука вытянута в пространство, что еще раз подтверждает решающую роль обуви в ЭСБ человека. Напряженность ЭСП составляет 700 кВ/м и 350 кВ/м соответственно при потенциале 30 кВ. На рис. 3.22 (в) показана «красная» зона в области ладони (напряженность ЭСП до 700 кВ/м), когда рука вытянута в сторону заземленного оборудования.



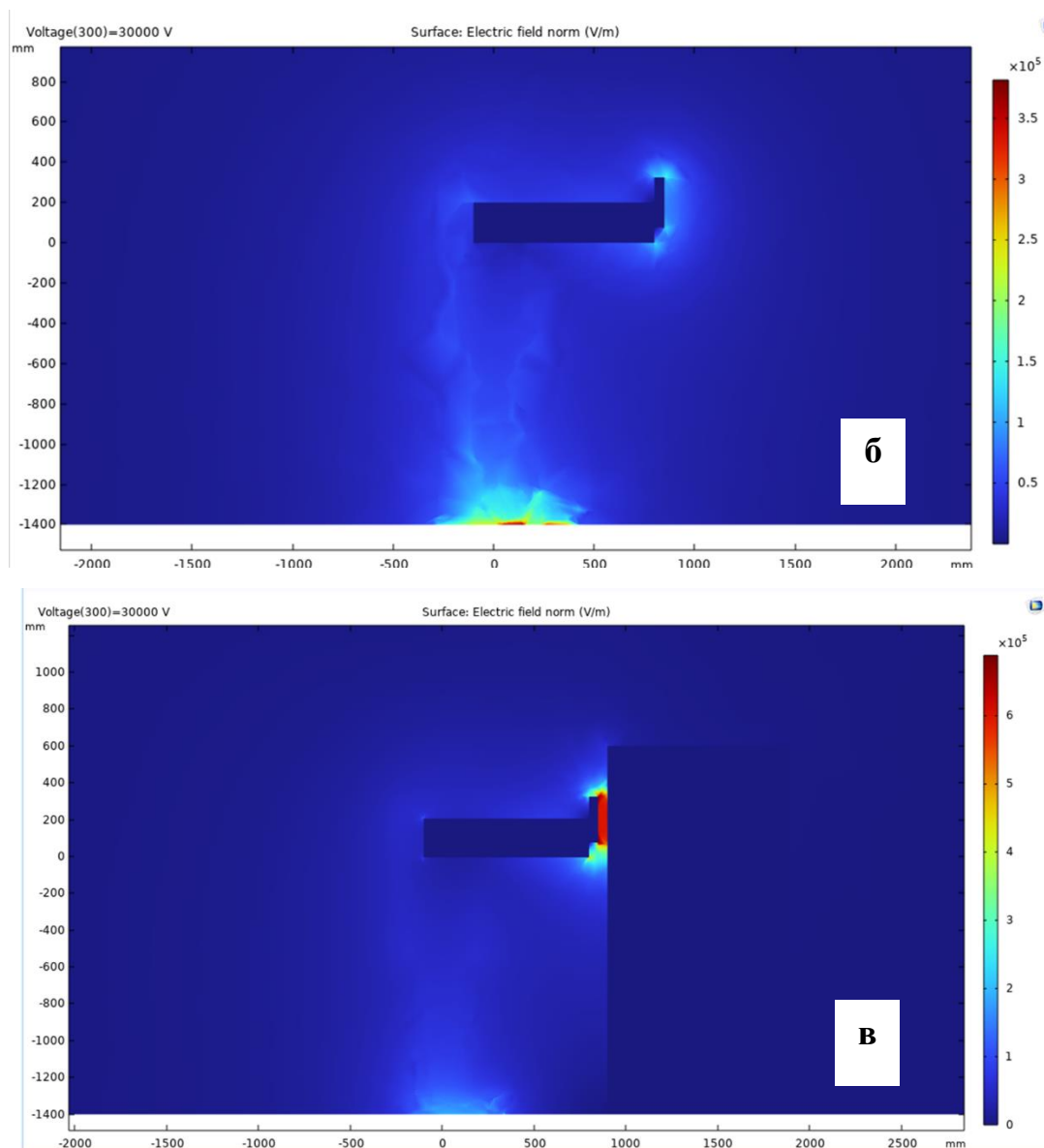


Рис. 3.22. Визуализация распространения электростатического заряда, Модель № 1, три варианта положения тела (а, б, в)

Полученные данные полностью согласуется с теорией и практикой, подтверждают базовые физические законы, когда значения напряженности ЭСП заряженного предмета резко возрастают в области максимальной кривизны поверхности («эффект острия»).

При моделировании параметров Модели № 2 (рис. 3.23, а, б, в) напряженность ЭСП при потенциале 30 кВ на теле человека достигает 1400-1800 кВ/м в положении «руки вдоль тела»; 200 кВ/м – когда одна рука вытянута в пространство и 700 кВ/м – рука вытянута в сторону заземленного оборудования.

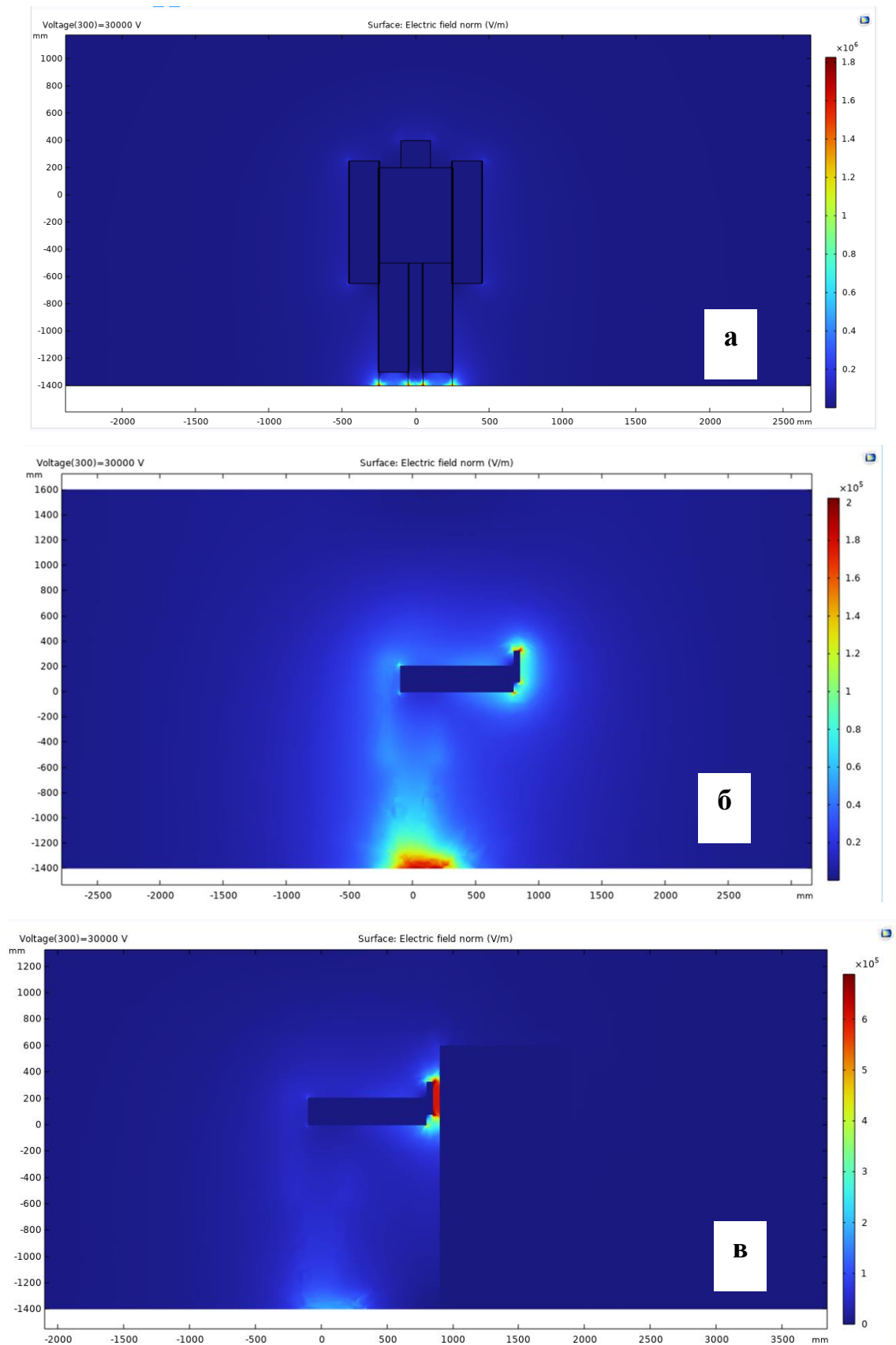
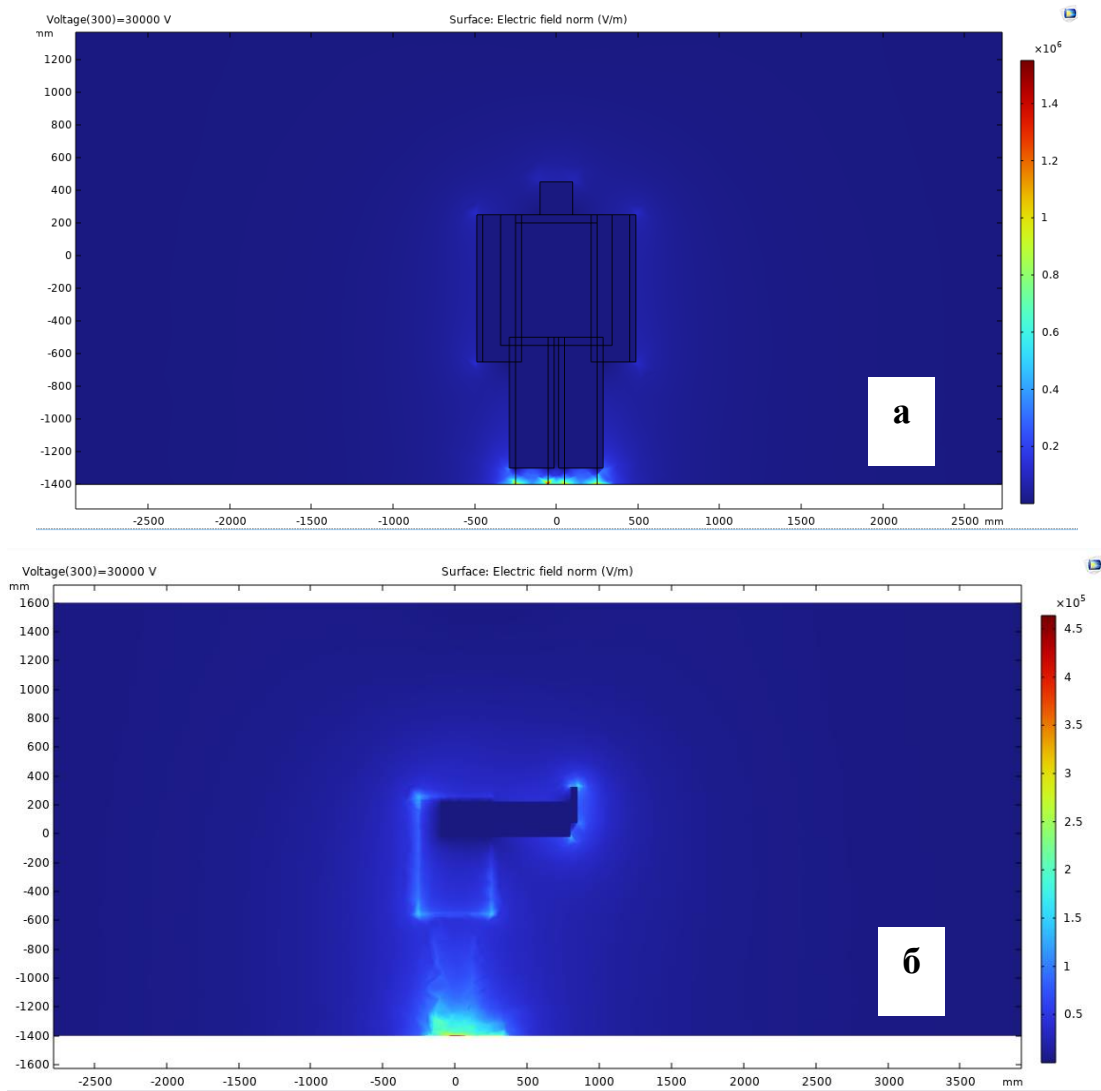


Рис. 3.23. Визуализация распространения электростатического заряда, Модель № 2, три варианта положения тела (а, б, в)

В Модели № 2 при положении руки вдоль тела напряжённость ЭСП на теле человека больше чем в 2,6 раза по сравнению с Моделью № 1, что говорит о несомненном влиянии одежды на величину электростатического заряда.

Результаты, полученные при параметрах Модели № 3 (рис. 3.24, а, б, в) показали, что при потенциале 30 кВ напряжённость ЭСП составляет 1500 кВ/м в положении «руки вдоль тела»; 450 кВ/м – когда одна рука вытянута в пространство и 700 кВ/м – рука вытянута в сторону заземленного оборудования. Соответственно, относительно Модели № 2 напряжённость ЭСП на теле человека в положении рук вдоль тел практически не изменилась, что говорит о незначительном влиянии толщины слоя одежды на теле человека на величину электростатического заряда и, следовательно, ЭСП [327].



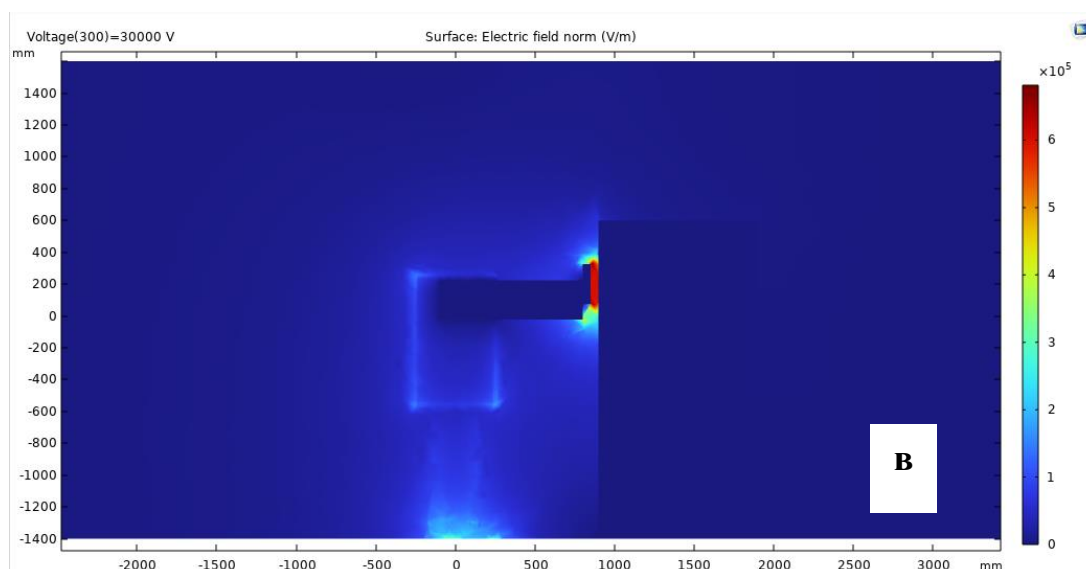


Рис. 3.24. Визуализация распространения электростатического заряда, Модель № 3, три варианта положения тела (а, б, в)

Характерные кривые зависимостей максимальных и усредненных значений напряжённости ЭСП на поверхности тела, растут пропорционально увеличению потенциала (рис. 3.25, Модель № 2). Средние значения достигают - 18,2 кВ/м, а максимальные - 2200 кВ/м, что более чем в 100 раз выше средних при потенциале 30 кВ.

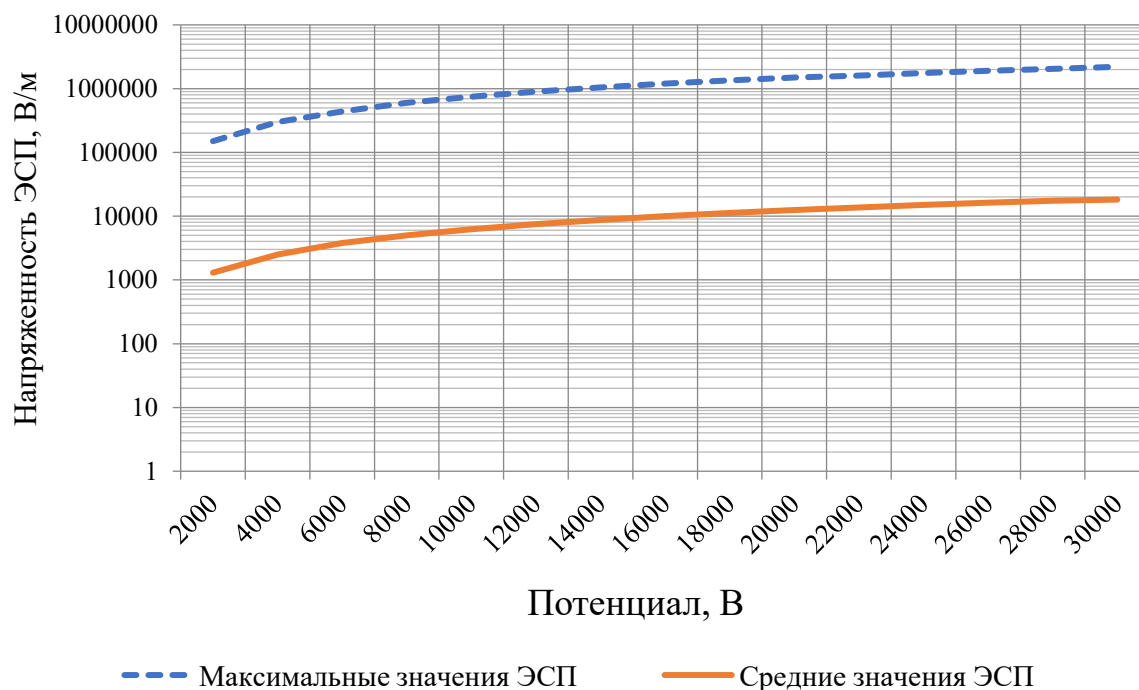
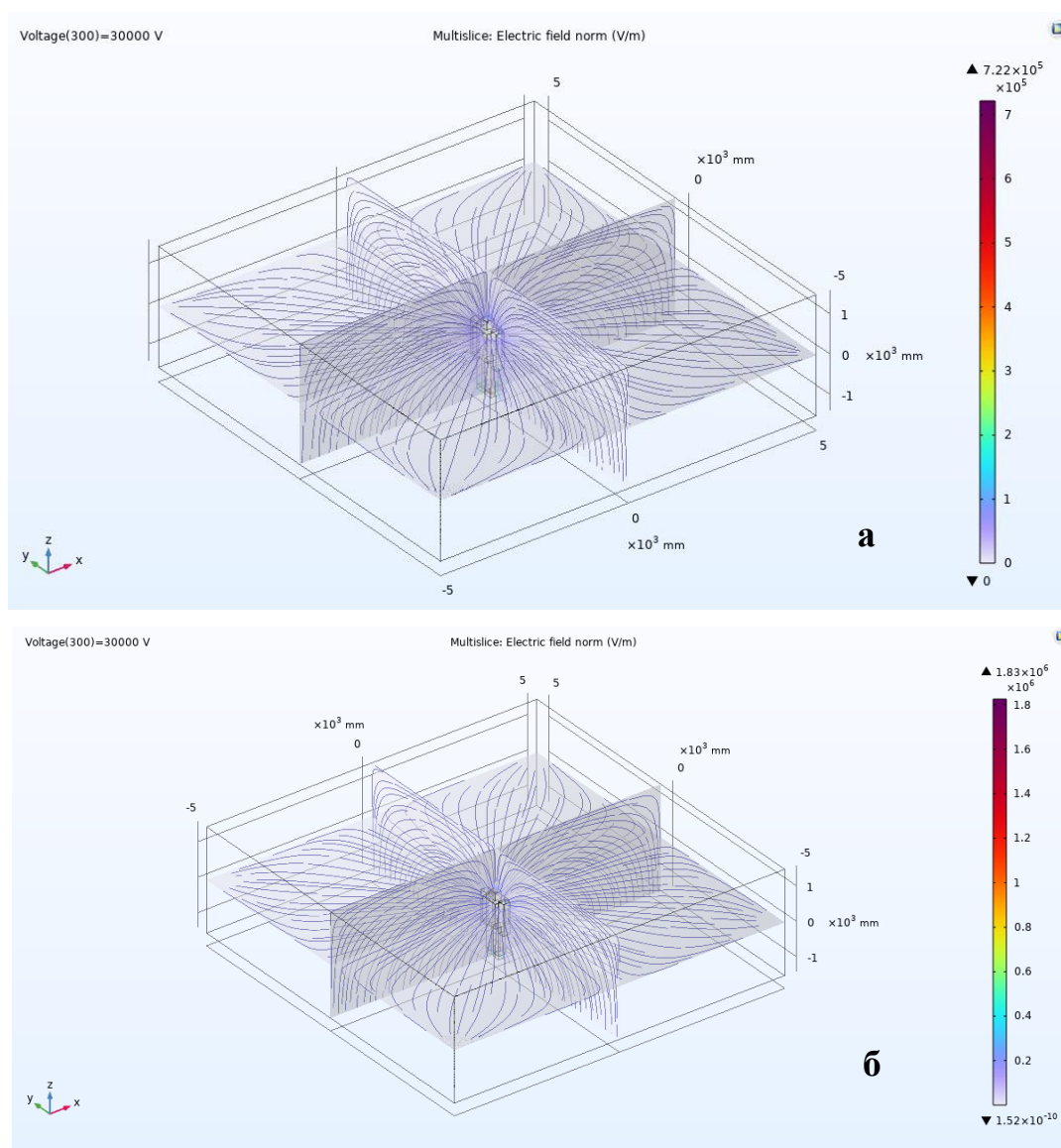


Рис. 3.25. Зависимости максимальных и средних значений напряжённости ЭСП от потенциала на поверхности тела, Модель № 2

Объемное распределение напряжённости ЭСП при потенциале на теле 30 кВ представленное на рис. 3.26 (а, б, в), зависит от формы и размеров тела человека, электрических свойств материалов одежды и обуви, параметров окружающей среды, а также наличия и характеристик источников электростатического заряда. Силовые линии ЭСП всегда незамкнуты: начинаются на положительных зарядах и заканчиваются на отрицательных. При этом, как и силовые линии других векторных полей, они не пересекаются и не касаются друг друга, а густота их тем выше, чем выше в данной зоне напряжённость ЭСП [327].



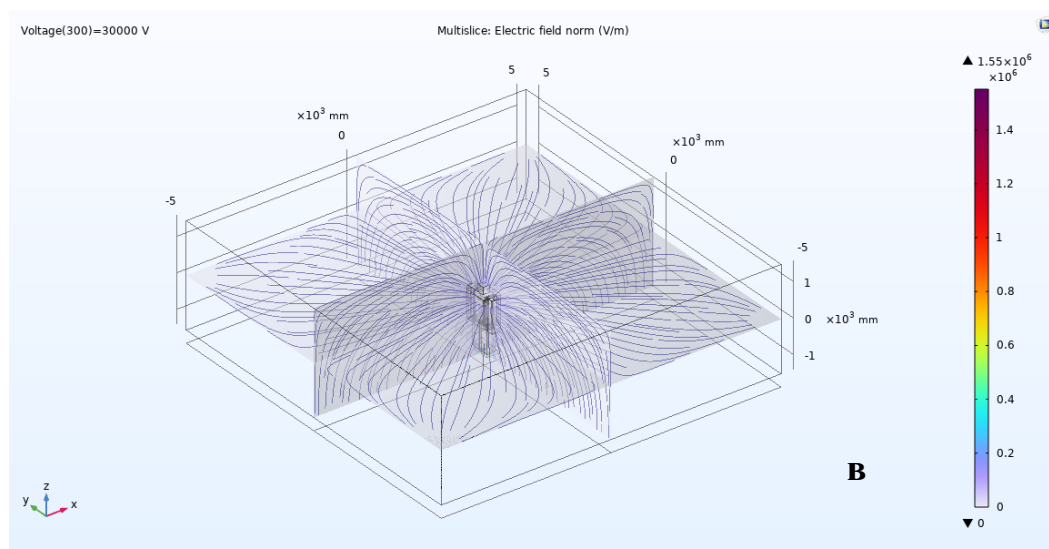


Рис. 3.26. Визуализация объемного распределения напряжённости ЭСП при потенциале на теле 30 кВ – 1, 2, 3 Модели (а, б, в)

Проведенный в ПО COMSOL Multiphysics, анализ взаимосвязи накопления электростатических зарядов на теле человека от электрического потенциала, наличия обуви и одежды с различной диэлектрической проницаемостью в системе «специальная обувь-человек-напольное покрытие» показал, что:

- величины напряженности ЭСП на поверхности тела (одежды) пропорциональны электрическому потенциалу человека;
- в реальных условиях ЭСП крайне неоднородно и значения напряженности на поверхности различных частей тела могут различаться на два порядка;
- представленный метод моделирования позволяет учитывать диэлектрические параметры материалов, варьировать толщину пакетов одежды и обуви [327].

В табл. 3.9 продемонстрированы полученные по результатам моделирования сводные значения напряженности ЭСП на теле человека в зависимости от его положения и типа одежды при потенциале 30 кВ.

Табл. 3.9. Значения напряженности ЭСП на теле человека при потенциале 30 кВ

Положение тела	Напряженность ЭСП, кВ/м		
	Модель № 1 без одежды, в обуви	Модель № 2 в легкой одежде, в обуви	Модель № 3 в легкой и теплой одежде, в обуви
Руки опущены вдоль тела	700	1400-1800	1500
Одна рука вытянута в пространство	350	200	450
Рука вытянута в сторону заземленного оборудования	700	700	700

Исходя из представленных данных, мы можем заметить несколько взаимосвязей и тенденций:

- при моделировании человека в одежде с различной диэлектрической проницаемостью и толщиной слоя напряженность ЭСП находится примерно в одном диапазоне, что говорит о незначительном влиянии характеристик одежды;
- положение тела человека в предметно-пространственной среде оказывает доминирующее воздействие на уровни напряженности ЭСП.

Таким образом, можно заключить, что влияние одежды и положения тела на уровень напряженности ЭСП не только взаимосвязано, но и многогранно, учитывая не только сложные взаимодействия между зарядом и поверхностью тела, но также динамику перемещения ЭСП в зависимости от различных факторов окружающей среды.

Метод моделирования ЭСП в программной среде комплекса COMSOL Multiphysics с модулем «Электростатика» может быть полезным при планировании экспериментальных исследований напряженности электростатического поля, образующегося вокруг человека, для оценки рисков возникновения электростатических зарядов и разработки мер снижения электростатической опасности на предприятиях при производстве и хранении легковоспламеняющихся материалов, электроники и пр., где статическое электричество, накопленное на персонале, может создать опасные ситуации и повлиять на эффективность процессов [327].

3.3. Имитационное статистическое моделирование электрического пробоя в защитном материале

Методы математического моделирования применимы не только для выявления потенциальных зон накопления статического электричества на человеке при взаимодействии с окружающей средой, но и исследования реакции различных диэлектриков и проводников на электростатическое поле.

Поэтому изучение электропроводных свойств материалов является актуальным, а методы компьютерного моделирования, которые позволяют имитировать возникновение и развитие электрического пробоя в материале, дают основу для понимания процесса статической электризации различных материалов и могут послужить основой для проектирования новых материалов с уникальными характеристиками.

Понимание того, что практически все материалы, используемые для изготовления обуви, являются диэлектриками, вызывает необходимость проведения имитационного статистического моделирования электрического пробоя в защитном материале.

Диэлектрические материалы для защиты от поражения электрическим током в электрическом поле поляризуются, но не допускают движения электрических зарядов. Это правило действует, пока величина напряженности поля не достигает критически больших значений. При превышении их, для каждого материала своего, уровня, в нем возникает движение зарядов, которое связано с изменениями свойств материала вследствие поляризации, в частности, его разогрева. Нарастание движения зарядов носит лавинообразный характер, поскольку действует эффект положительной обратной связи: возникновение движения увеличивает изменения в материале, что способствуют увеличению потока зарядов, и, как следствие, преобразованиям в материале, и т.д. Макроскопически описываемый процесс проявляется как явление, именуемое электрическим пробоем. Важно, что как первоначальные трансформации в материале, так и последующее их нарастание происходит одновременно во многих точках объема, распределенных хаотически,

причем в первую очередь в наиболее «слабых», с точки зрения описываемого процесса, элементах объема. Начавшийся процесс движения зарядов не заполняет весь объем материала, а распространяется вдоль траекторий, которые пролегают по близлежащим, наиболее, в данном контексте, слабым, точкам, проявляя, как и весь процесс пробоя, свою геометрию молниевым разрядами в атмосфере.

Очевидно, что условия пробоя зависят как от приложенного электростатического поля, так и особенностей распределения «слабых» точек в пространстве материала. Поэтому математическая модель этого процесса привлекательна как инструмент для решения различных задач, связанных с электрическим пробоем и защитными свойствами материала. Поскольку модель должна описывать динамический стохастический процесс, целесообразно сразу строить математическую модель в виде компьютерной программы, имитирующей этот процесс с учетом его вероятностной природы.

Такого рода задачи относятся к приложениям известной математической теории ветвящихся вероятностных процессов с уравнениями Ланжевена, Колмогорова – Фоккера – Планка, теорией броуновского движения Эйнштейна и др. [123, 124, 323, 329].

Рассмотрим теорию электрического пробоя на примере плоского конденсатора. Электрический пробой в твердом диэлектрике связан с неоднородностями структуры материала диэлектрика. Построим поле в диэлектрике плоского конденсатора, имеющего каверну (пустоту, заполненную воздухом). Для наглядности выберем геометрическую модель сечения плоского конденсатора (рис. 3.27). Каверна достаточно больших размеров и имеет треугольную форму, чтобы эффект ее присутствия проявился убедительно.

На рис. 3.27 номерами 1, 6, 2 и 3 обозначены металлические обкладки конденсатора. К поверхностям 1, 2 и 3 приложена постоянная разность потенциалов U . Поверхность 3 заземлена. Длина обкладок L , расстояние между обкладками H , габариты каверны: основание A , высота B .

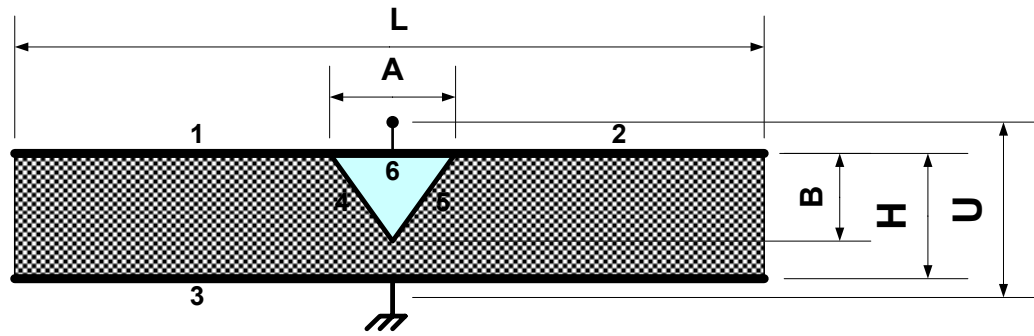


Рис. 3.27. Геометрическая модель плоского конденсатора с треугольной каверной

Ее стороны обозначены 4, 5 и 6. Для перечисленных величин приняты следующие значения: $L = 0,1$ м, $H = 0,05$ м, $A = 0,02$ м, $B = 0,03$ м, $U = 1000$ в. Материал диэлектрической прокладки – нейлон 6.6, заполнение каверны – воздух.

Известно, что наибольшие значения напряженности электростатического поля достигаются в окрестностях наибольшей кривизны границ между двумя средами: металл – диэлектрик, два разных диэлектрика и т.п. Чтобы убедиться в этом, вычислим поля потенциала и напряженности ЭСП для схемы (см. рис. 3.27). Расчет выполнен с применением метода конечных элементов в системе COMSOL.

Геометрическая модель и сетка конечных элементов в COMSOL показана на рис. 3.28.

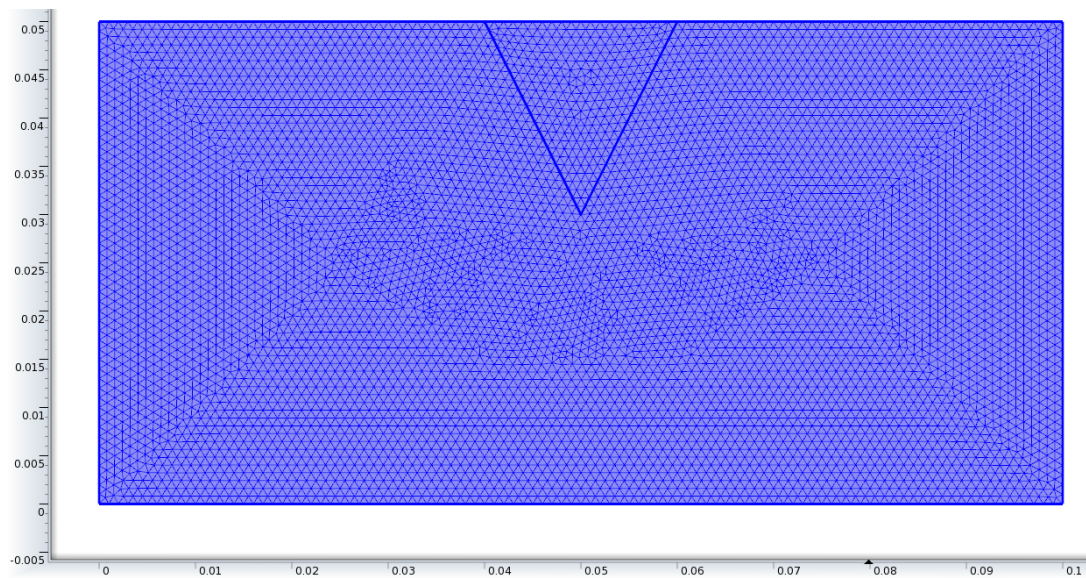


Рис. 3.28. Геометрическая модель и сетка конечных элементов в COMSOL

В первом варианте модели поверхности 1, 6 и 2 находятся под напряжением U . На рис. 3.29 показаны линии равного потенциала (почти горизонтальные

кривые) и равных величин напряженности. Очевидно, что точками концентрации напряженности поля являются угловые точки границы двух диэлектрических сред.

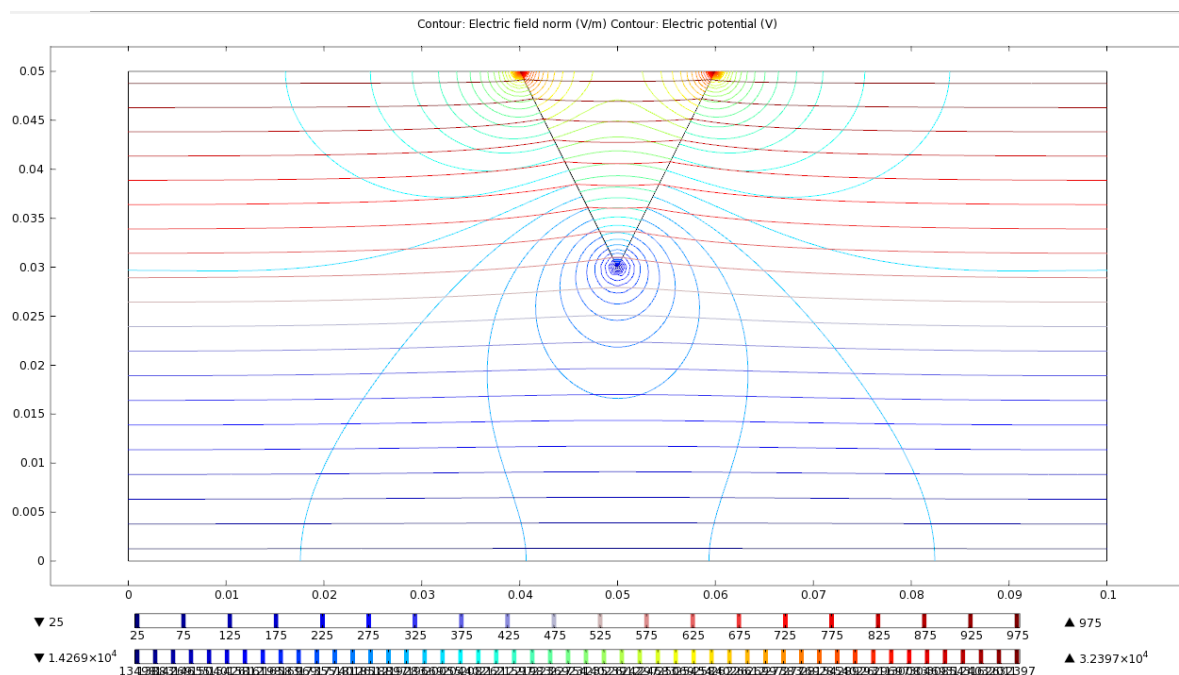


Рис. 3.29. Концентрация напряженности ЭСП на границах сред, когда под напряжением находятся поверхности 1, 6 и 2

Во втором варианте модели под напряжением U находятся поверхности 1, 4, 5 и 2, т.е. поверхность раздела диэлектриков является эквипотенциальной. Решение для этого варианта показано на рис. 3.30.

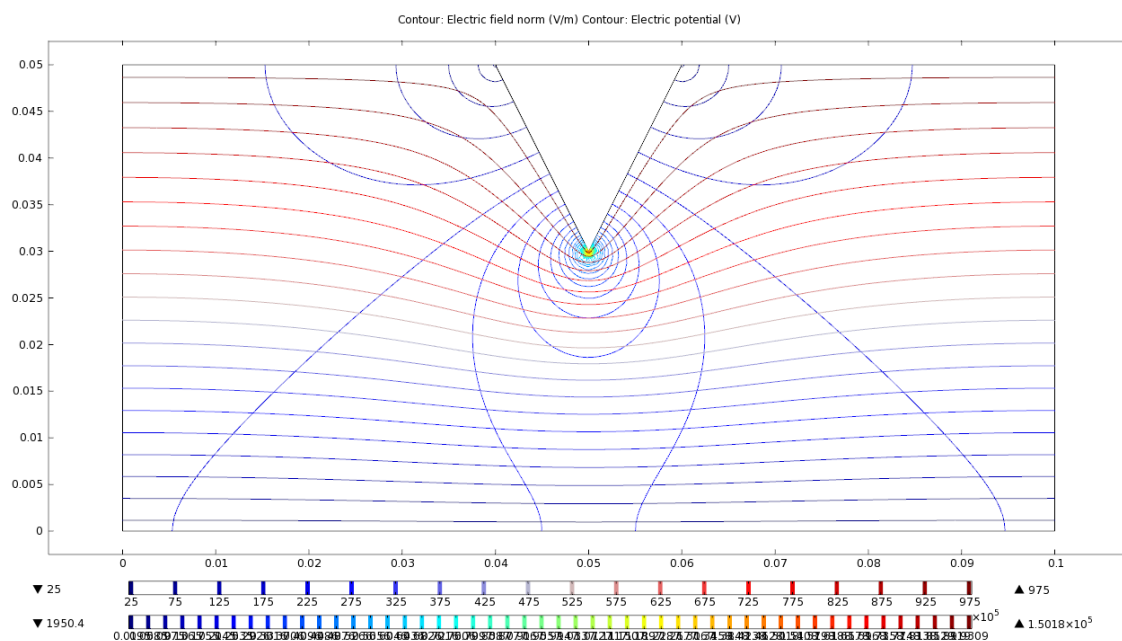


Рис. 3.30. Концентрация напряженности ЭСП на границах сред, когда под напряжением находятся поверхности 1, 4, 5 и 2

В этом варианте, несмотря на значительно большее искривление линий уровня потенциала, основная концентрация напряжения сосредоточена в окрестности острия каверны. Этот вывод распространяется и на плотность энергии электростатического поля – наибольшая плотность энергии приходится на острие каверны. Электродинамика сплошной среды изучает физику электрических явлений в веществах, рассматриваемых как сплошная среда. Специфическое поведение конкретного вида вещества в электромагнитном поле зависит от его атомно-молекулярного строения и агрегатного состояния и описывается так называемыми «феноменологическими» зависимостями. Эти зависимости отображают макроскопическое поведение материала под действием электромагнитного поля. Отображение специфики вещества сосредотачивается в коэффициентах – параметрах зависимости, значения которых находят из опытов с образцами вещества. Вместе с тем, в отличие от эмпирических зависимостей, феноменологические строятся исходя из базовых теоретических представлений об атомно-молекулярном строении материи и агрегатном состоянии вещества.

В задаче электрического теплового пробоя используется зависимость такого рода – закон Аррениуса. Он феноменологически описывает аддикцию скорости химической реакции от энергии активации этой реакции и абсолютной температуры, которая отражает агрегатное состояние вещества. Энергия активации задает нижнее пороговое значение энергии частиц вещества, необходимой для начала реакции. Поскольку электрическую проводимость можно рассматривать как своего рода реакцию вещества на внешнее электрическое поле, закон Аррениуса распространяют и на проводимость или удельное сопротивление. В этом случае формула, отображающая закон Аррениуса, имеет вид:

$$r = r_0 \cdot \exp \left(-b \cdot \frac{U - U_0}{T} \right) \quad (3.3)$$

где:

r_0 – удельное сопротивление вещества при отсутствии внешнего электрического поля при абсолютной температуре T ;

U_0 – энергия активации;

b – коэффициент отображает специфические свойства конкретного вещества;
 U – энергия элементов (частиц) вещества, осуществляющих его электропроводность. Например, в полупроводниковом веществе это электроны и дырки. Если $U < U_0$, удельное сопротивление остается равным r_0 практически во всем диапазоне температур (кроме температур, близких к абсолютному нулю).

Перепишем закон Аррениуса (3.3) в обобщенной форме

$$f = \exp\left(-\frac{u}{T}\right) \quad (3.4)$$

где

$$f = r / r_0;$$

$$u = U - U_0;$$

T - температура измеряется в единицах, при которых $b = 1$.

На рис. 3.31 показаны графики зависимости f от температуры при разных значениях u . Графики получены с помощью скрипта:

%закон Аррениуса

%удельное сопротивление $R=R_0 \exp\{-b (U-U_0) / T\}$ при $U>U_0$ и $R=\inf$ при $U<U_0$, или $f = \exp\{-b u / T\}$

clear, clc; b=1;

UmUo=[0,0.025,0.05,0.25,0.5,0.75,1,2,4,7,10];

for u=UmUo

T=0.001:0.001:2; c=[rand,rand,rand];

f=exp(-b*u./T); plot(T,f,'color',c);

hold on; ylim([-0.1,1.1])

end

Кривые на рис. 3.31 наглядно показывают – с ростом температуры нарастает удельное сопротивление. Это объясняется усилением хаотической составляющей движения носителей заряда по сравнению с направленным движением под действием электрического поля. С увеличением энергии носителей удельное сопротивление уменьшается тем больше, чем больше эта энергия.

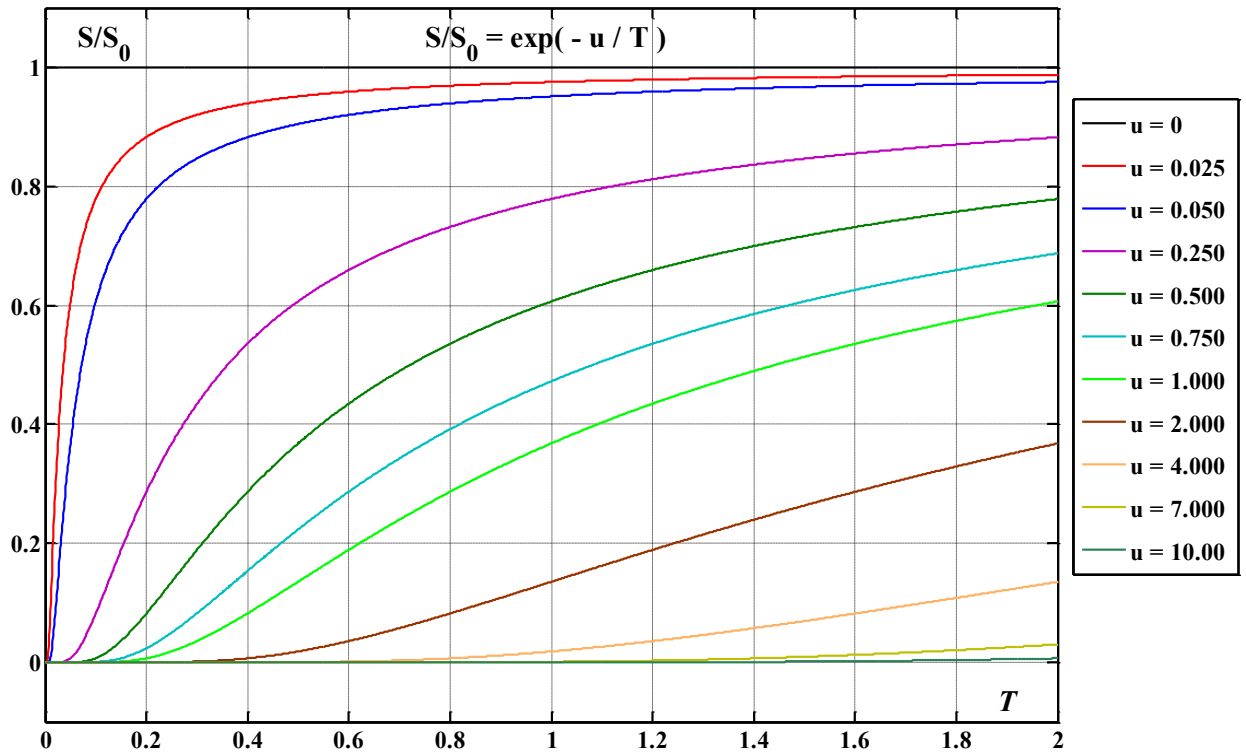


Рис. 3.31. Зависимость изменения температуры среды от приложенного потенциала

Чтобы понять, как меняется траектория прохождения зарядов в среде диэлектрика применена теория перколяции [325, 326]. Слово *percolatur* по латыни означает «фильтрация, просачивание». В отличие от диффузии, при которой некоторая субстанция (жидкость, тепло, и др.) распространяется в среде, постепенно заполняя весь доступный объем. При перколяции проникновение субстанции (например, электрического заряда) происходит лишь по отдельным траекториям, которые располагаются в среде зачастую весьма тесно и витиевато, но сплошь не заполняют ее. Процесс перколяции служит моделью большого числа разных явлений из самых разных областей: от физики до медицины и гуманитарных наук.

Существенным для развития перколяционного процесса является неоднородность среды, в которой на каждом этапе процесса существует дискриминантный выбор между «своими» и «чужими» близлежащими элементами или областями для присоединения их к области распространения перколяционных эффектов или, наоборот, исключения.

Рассмотрим влияние неоднородности электрического сопротивления материала на его проводимость. Простейшая схема измерения удельного сопротивления материала показана на рис. 3.32.

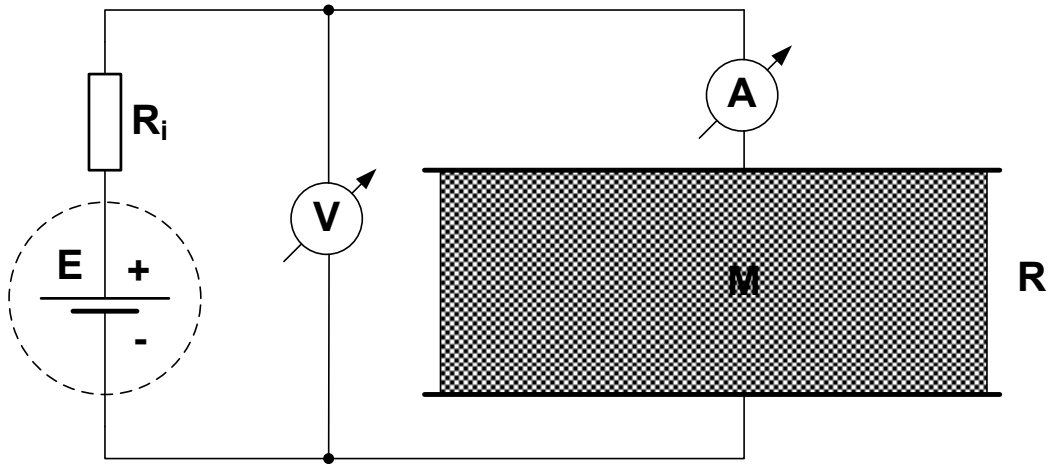


Рис. 3.32. Схема измерения электрического сопротивления материала

На схеме:

E – электродвижущая сила (ЭДС) источника постоянного тока;

R_i – внутреннее сопротивление источника;

V и A – вольтметр и амперметр соответственно;

R – сопротивление исследуемого материала M .

Согласно закону Ома для полной цепи сопротивление материала равно

$$R = \frac{E - I \cdot R_i}{I} = \frac{V}{I} \quad (3.5)$$

где: I – ток в цепи (показание амперметра),

V – напряжение (разность потенциалов) на обкладках токопроводящих пластин измеряемого образца материала (показание вольтметра).

Сопротивление R пересчитывается в удельное сопротивление ρ материала по формуле

$$\rho = \frac{R \cdot S}{L} \quad (3.6)$$

где:

L – длина (толщина) материала вдоль направления тока,

S – площадь поперечного сечения.

Ток образуется как суммарное движение электрических зарядов между обкладками. Заметим, что если материал неоднородный, то удельное сопротивление отражает усредненное значение сопротивления материала движению зарядов.

Защитные свойства диэлектрического материала зависят от его удельного сопротивления, которое оценивают согласно закону Ома по формуле $R = U / I$, в которой I – ток, протекающий через образец материала при разности потенциалов U , приложенной к образцу. Удельное сопротивление равно $r = R S / L$, где S – площадь поперечного сечения, а L – длина образца в направлении приложения разности потенциалов.

Моделирование электрического сопротивления неоднородного материала.

Если испытываемый материал электрически неоднороден, т.е. имеет распределенные по его объему случайные вариации удельного сопротивления, то найденное описанным способом удельное сопротивление дает лишь усредненное по объему образца значение.

Чтобы показать роль неоднородности, рассмотрим плоский прямоугольный образец, разделенный на четыре одинаковых по размеру части, в пределах каждой из которых считаем материал электрически однородным. Для такого образца можно построить две эквивалентные схемы соединения сопротивлений (рис. 3.33).

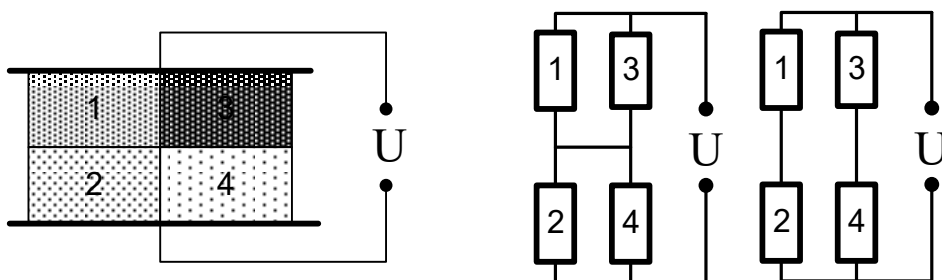


Рис. 3.33. Схемы эквивалентных соединений сопротивлений для неоднородного образца

Общее сопротивление образца, выраженное через сопротивления его четырех частей, для 1-го и 2-го вариантов схем равно:

$$R(1) = \frac{R_1 R_3}{R_1 + R_3} + \frac{R_2 R_4}{R_2 + R_4}, \quad R(2) = \frac{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)}{R_1 + R_2 + R_3 + R_4} \quad (3.7)$$

Очевидно, что если материал однороден, и сопротивления всех частей одинаковы: $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R$, то сопротивление образца будет равно R . Отличие в величине сопротивления одной из частей сказывается на величине общего сопротивления образца. Например, если $R_1 \ll R_2 = R_3 = R_4 = R$, то $R(1) \approx R / 2$, $R(2) \approx 2 R / 3$. Наоборот, если $R_1 \gg R_2 = R_3 = R_4 = R$, то $R(1) \approx 3 R / 2$, $R(2) \approx 2 R$. Таким образом, согласно простейшим схемам замещения, локальные отклонения сопротивления от усредненного значения могут приводить к вариациям общего сопротивления в большую или меньшую стороны.

Для более детального исследования схем замещения 1 и 2 (см. рис. 3.33) используем метод статистического моделирования. Случайные значения сопротивлений R_1, R_2, R_3, R_4 генерируются при одном и том же среднем R_{sr} и одинаковым коэффициентом вариации CVR . В качестве закона распределения выберем нормальное с исключением возможных отрицательных значений.

Для каждого набора значений R_1, R_2, R_3, R_4 вычислим $R(1)$ и $R(2)$, и затем построим оценки их распределений (функций плотности вероятностей - ФПВ). Процедуру реализует приведенный ниже скрипт:

```
% Монте-Карло для сопротивления 4 неоднородных участков (p21.m)
clear, clc; tic; n=10000000; Rsr=100; CVR=0.25;
R1=Rsr*abs(1+CVR*randn(n,1));      R2=Rsr*abs(1+CVR*randn(n,1));
R3=Rsr*abs(1+CVR*randn(n,1));      R4=Rsr*abs(1+CVR*randn(n,1));
RR1=(R1.*R3)./(R1+R3)+(R2.*R4)./(R2+R4);
RR2=(R1+R2).*(R3+R4)./(R1 +R2+R3+R4);
[n1,xout] = hist(RR1,100); bar(xout,n1/n); hold on
[n2,xout] = hist(RR2,100); bar(xout,n2/n)
Tm=toc
```

На рис. 3.34 и 3.35 показаны результаты работы скрипта - гистограммы (оценки ФПВ) для $R(1)$ и $R(2)$ при $CVR = 0.25 = 25\%$ и $CVR = 0.001 = 1\%$.

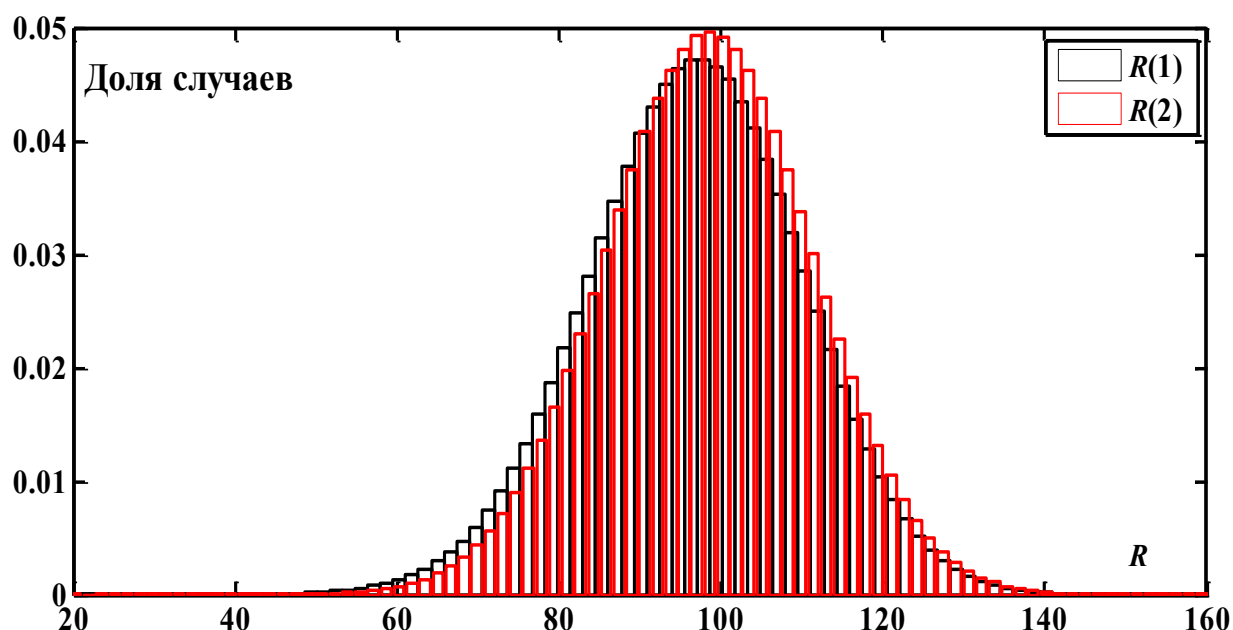


Рис. 3.34. Распределение сопротивления при $CVR = 25\%$

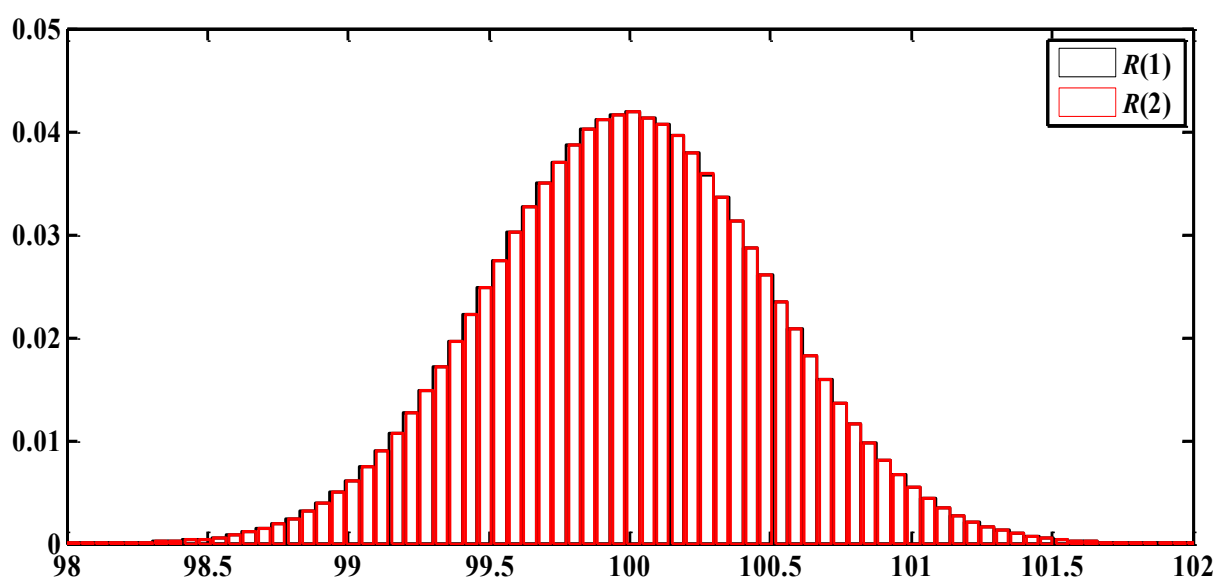


Рис. 3.35. Распределение сопротивления при $CVR = 1\%$

Как видно из рисунков, обе эквивалентные схемы приводят к практически неразличимым между собой законам распределения, что говорит о незначительном влиянии различий в схемах. При этом разброс значений возрастает пропорционально неоднородности материала, т.е. CVR . Среднее

значение остается неизменным и не зависит от случайных вариаций неоднородности материала.

Влияние неоднородности материала на электрический пробой в сильных статических полях.

При малых разностях потенциалов U диэлектрический материал практически не пропускает тока. Однако, при нарастании разности потенциалов в материале происходят структурные изменения, которые в конечном итоге приводят к электрическому пробое, причем в возникновении пробоя существенную роль играет неоднородность материала.

В окрестности локальных участков неоднородности возникает повышенный градиент потенциала, т.е. значительно возрастает напряженность поля. При этом происходит и повышенное выделение энергии, отдаваемой движущимися зарядами в материал в рассматриваемой локальной области. Под действием напряженности и выделяемой энергии происходят структурные изменения в материале, локальная проводимость материала возрастает, и электрический ток в этой области превышает ток в соседних областях материала. Возникающий эффект положительной обратной связи распространяется на соседние участки с большей, чем у соседних участков, проводимостью – возникает канал распространения электрического разряда с повышенной проводимостью между пластинами с приложенной разностью потенциалов. Детально процесс развития токопроводящего канала при пробое диэлектрического материала описан, например, в трудах Сканава Г.И. [324].

На основе описанного представления разработана компьютерная модель имитации возникновения и развития пробоя в слое диэлектрика. Ниже в обобщенной форме приведен алгоритм имитации (рис. 3.36).

Распишем более подробно этапы алгоритма:

1. На границе образца материала отыскивается участок с наибольшей локальной проводимостью. С этого участка и начинается канал пробоя.

2. В окрестности найденного участка отыскивается участок с наибольшей среди соседних участков локальной проводимостью. В этот участок и распространяется канал пробоя.

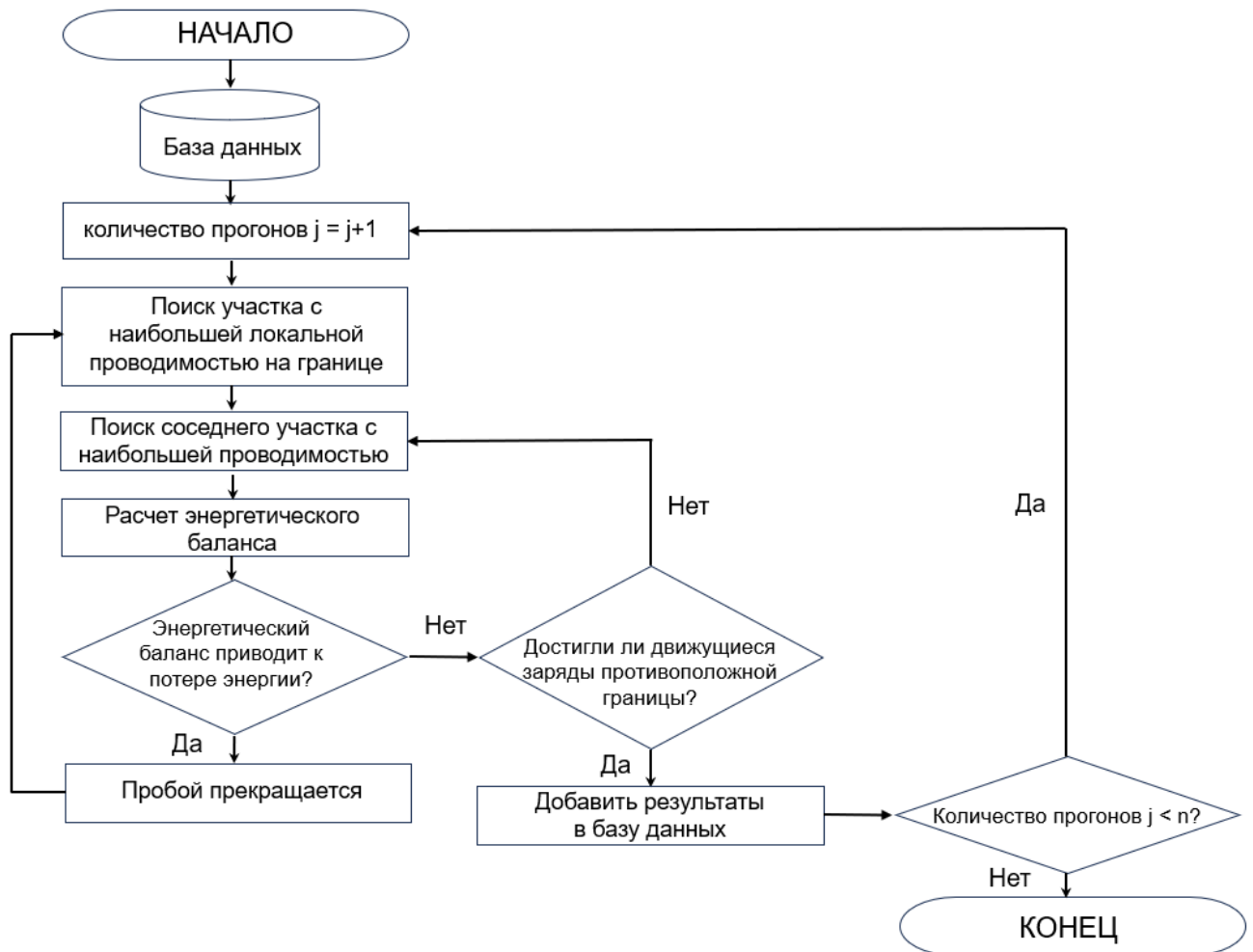


Рис. 3.36. Алгоритм имитации пробоя в слое диэлектрика

3. Подсчитываются потери энергии зарядов, протекающих в следующий участок, и приобретение энергии за счет новых подвижных зарядов, включившихся в движение. Если энергетический баланс приводит к ситуации полной потери энергии, то пробой прекращается и не распространяется далее вглубь материала.

4. Пункты 2 и 3 алгоритма повторяются, пока участки с движущимися зарядами не достигнут противоположной границы материала или не прекратят распространение из-за недостатка энергии.

5. Пп. 1 – 4 имитационной модели повторяют многократно, накапливая статистические данные и оценки по прогонам.

По разработанному алгоритму построена математическая компьютерная модель и алгоритм статистической имитации электрического пробоя.

Постановка задачи. С возрастанием напряженности электрического поля в материале возникают структурные изменения разной природы, связанные с особенностями молекулярного строения материала и его состояния. Любой материал содержит области с нарушением идеальной однородности. Локальные нарушения структуры усиливают эту неоднородность, поэтому вблизи поверхности или на самой поверхности материала появляются участки с электрической проводимостью, превосходящей значения на соседних. Такие участки являются «зародышами» мест возникновения электрического пробоя.

Исследования многих материалов и их электрического пробоя выделяют четыре группы причин:

- тепловая – локальный нагрев повышает проводимость и способствует возникновению пробоя;
- электромеханическая – механические нарушения (сжатия, растяжения, сдвиги) в материале, локально изменяющие его структуру в отдельных областях среды и ее границы;
- ионизационная – появление в материале носителей заряда (электронов, ионов, дырок), которые способствуют пробую;
- перегрев (значительное повышение подвижности) носителей электрического заряда под действием электрического поля.

На начальном этапе для достижения некоторого порога требуется расход энергии электрического поля на повышение подвижности (кинетической энергии) носителей заряда, после которого возникает эффект положительной обратной связи: процесс происходит в самоподдерживающем режиме. Например, в случае теплового пробоя с этого момента выделяемая энергия превосходит отводимую тепловую, вследствие чего создаются условия для дальнейшего распространения пробоя.

Независимо от причин, электрический пробой проявляется в возникновении в материале между его поверхностями с разными потенциалами пути, вдоль которого протекают заряды, замыкающие эту разность потенциалов. Траектория пути имеет хаотическую форму, поскольку пролегает на каждом локальном участке по элементам среды с наименьшим сопротивлением движению зарядов.

Проходя такой участок, заряды теряют электрическую энергию, накопленную за счет разности потенциалов. Эта энергия рассеивается в тепло вдоль пути и вносит изменения в материал, поддерживающие проводимость в области пробоя. Если начальная энергия недостаточна, то поток зарядов не достигает поверхности материала с низким потенциалом, и пробоя не происходит.

Очевидно, что описанная схема продвижения электрических зарядов в материале в процессе пробоя носит стохастический, вероятностный характер. Построим на основе описанного представления об электрическом пробое компьютерную имитационную модель статистической динамики этого явления.

Алгоритм и решение задачи. Алгоритм статистической имитации основан на следующей схеме. Рассматривается плоская (двумерная) задача. Образец материала – прямоугольный. Его размеры по осям X и Y проквантованы. Координаты точек образца задаются дискретными координатами $x = 1, \dots, M$, $y = 1, \dots, N$. Расход энергии потока зарядов на преодоление области в окрестности $(x; y)$ описывается функцией $g(x, y)$, которая и задает свойства материала по отношению к электрическому пробую. Эта функция имеет постоянную составляющую mg , случайные вариации с среднеквадратическим отклонением sg и может содержать детерминированные монотонные или периодически меняющиеся значения.

Примем, что пробой начинается в некоторой стартовой точке с координатами $[1, y_0]$, в которой электрический заряд имеет начальную потенциальную энергию E_0 . На каждом шаге моделирования вершина пробоя перемещается на единицу в сторону возрастания координаты x . По оси y происходит перемещение в одну из трех точек $y-1, y, y+1$, то есть в ту из них, в которой величина $g(x, y)$ меньше расхода энергии на преодоление этого шага распространения траектории пробоя. При этом заряд теряет энергию на соответствующую величину g .

Итерации продолжаются, пока вершина пробоя не достигнет противоположной границы ($x = M$), или энергия заряда не уменьшится до нуля. Если траектория пробоя попадает на одну из границ $y = 1$ или $y = N$, происходит либо скольжение вдоль границы, либо отражение траектории от границы, в зависимости от положения локального минимума $g(x,y)$.

Ниже приведен скрипт, реализующий алгоритм моделирующей программы:

```

1.  % модель электрического пробоя p16.m
2.  clear, clc; tic; Npovt=20000 %число повторных прогонов
3.  M=600; N=501; % толщина и ширина слоя среды
4.  mg=100; sg=5; % среднее и СКО неоднородности среды
5.  g=normrnd(mg,sg,N,M); % случайная неоднородность среды
6.  % масштабирование для отображения неоднородности
7.  G=(g-min(min(g)))/(max(max(g))-min(min(g)));
8.  image(G*100); % рисование поля неоднородности среды
9.  kR=[]; kt=[]; % контейнеры для результатов
10. for povt=1:Npovt % начало цикла моделирования
11.  SumR=0;
12.  g = normrnd(mg,sg,N,M); % неоднородность текущего прогона
13.  xyt = [250,1]; %начальное положение
14.  t=1; % счетчик шагов распространения траектории
15.  ind=1; % значение индикатора на следующем шаге
16.  while ind>0 % проверка индикатора достижения границы
17.  ind=0; x=xyt(t,1); y=xyt(t,2); % текущая точка конца траектории
18.  if y+1<=M && x-1>=1 && x+1<=N % если точка - внутри среды,
19.  gmin=g(x,y+1); xy=[x,y+1]; % то поиск минимума в точках, соседних с
текущей точкой
20.  if g(x-1,y+1)<gmin gmin=g(x-1,y+1); xy=[x-1,y+1]; end;
21.  if g(x+1,y+1)<gmin gmin=g(x+1,y+1); xy=[x+1,y+1]; end;
22.  ind=1; % шаги продолжаются в точку с наименьшим g
23.  end

```

```

24.  if y+1<=M && x-1>=1 && x+1>N % если точка у границы x=N
25.  gmin=g(x,y+1); xy=[x,y+1];
26.  if g(x-1,y+1)<gmin gmin=g(x-1,y+1); xy=[x-1,y+1]; end;
27.  ind=2; % шаги продолжаются в точку с наименьшим g
28.  end
29.  if y+1<=M && x-1<1 && x+1<=N % если точка у границы x=1
30.  gmin=g(x,y+1); xy=[x,y+1];
31.  if g(x+1,y+1)<gmin gmin=g(x+1,y+1); xy=[x+1,y+1]; end;
32.  ind=3; % шаги продолжаются в точку с наименьшим g
33.  end
34.  xyt=[xyt;xy]; t=t+1;
35.  if xy(1,1)<=1 | xy(1,1)>=N | xy(1,2)>=M ind=0; end % если любая из границ
достигнута
36.  SumR= SumR+gmin; % накопление расхода энергии
37.  end % завершение цикла моделирования
38.  if t>=M-1
39.  kR=[kR;SumR/t]; kt=[kt;t];
40.  end
41.  hold on, stairs(xyt(:,2),xyt(:,1),'-k','linewidth',0.5)
42.  end
43.  Tmod=toc, t, Rm=mg, Rsr=mean(kR), SKOR=std(kR)
44.  Rmin=min(kR), Rmax=max(kR), cvR=SKOR/Rsr

```

На рис. 3.37 показаны пять вариантов траекторий пробоя диэлектрика (выделен фрагмент моделируемого образца, в пределах которого сосредоточились траектории). очевидно, что все они устремлены от $x = 0$ к $x = M = 600$ со случайными отклонениями по оси y . Цветным фоном показана неоднородность среды диэлектрика.

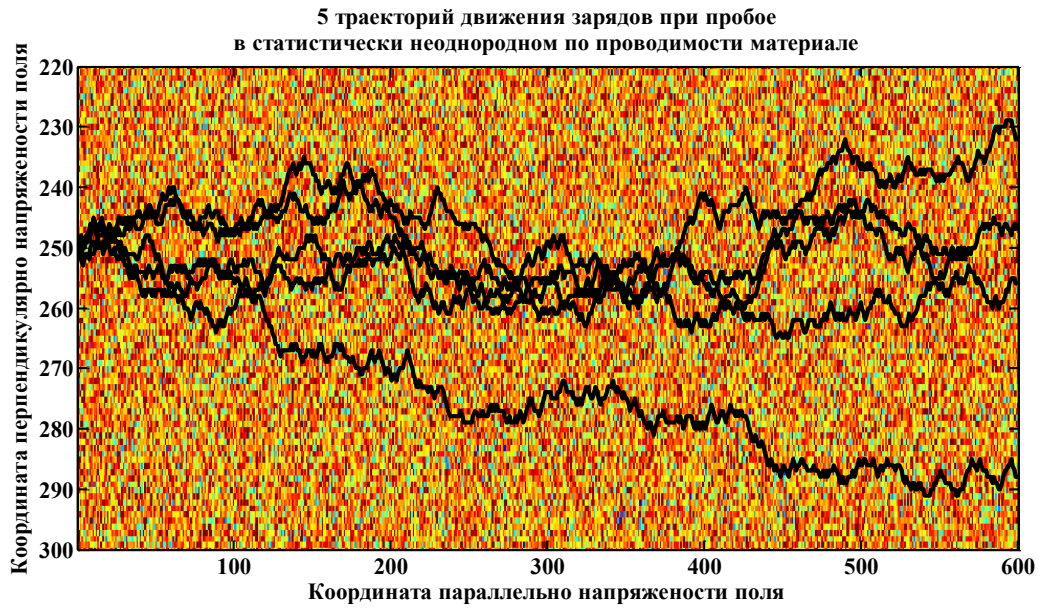


Рис. 3.37. Пять траекторий движения зарядов при пробое в статистически неоднородном по проводимости материале

По сути, канал электрического пробоя, отображаемый траекторией заряда в среде диэлектрика, есть траектория случайного блуждания при постоянном дрейфе (сносе) «дрейфующей» точки – вершины пробоя – в направлении разности потенциалов действующего в диэлектрике электрического поля.

На рис. 3.38 показаны некоторые реализации траекторий каналов пробоя без фонового отображения неоднородности материала в образце материала толщиной $H = 100$ для двумерной модели.

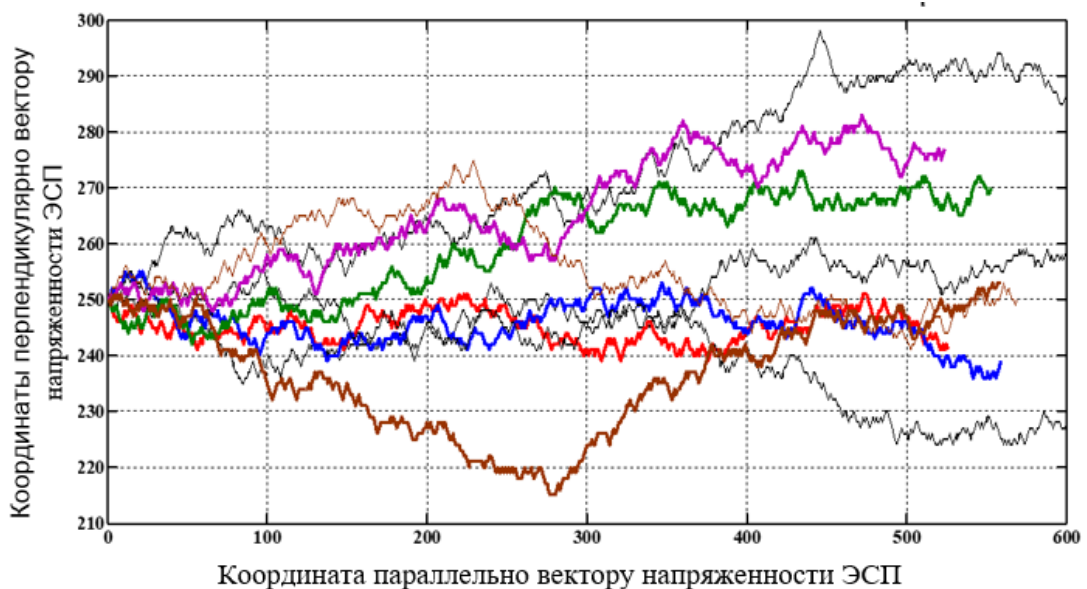


Рис. 3.38. Примеры траекторий движения электрических зарядов под действием внешнего поля, близкого к напряжению пробоя

Все траектории начинаются из одной и той же точки ($x = 0; y = 0$). Траектории, не достигшие противоположной границы, выделены цветом. Они соответствуют случаю, когда пробоя толщины материала не произошло.

Как и в других перколяционных процессах, 100% пробой достигается при определенном граничном соотношении, в данном случае, если граничный уровень энергии, ниже которого электрический ток в материале прекращается, обусловлен конкретным (заданным) порогом относительно начальной энергии зарядов.

Эта специфика пробоя отображена на рис. 3.39, который показывает, что вероятность пробоя, т.е. доля траекторий движения зарядов, достигающих противоположной стороны образца, скачкообразно изменяется при изменении уровня пробойного потенциала в пределах от 0,43 до 0,47 от внешнего приложенного потенциала [60].

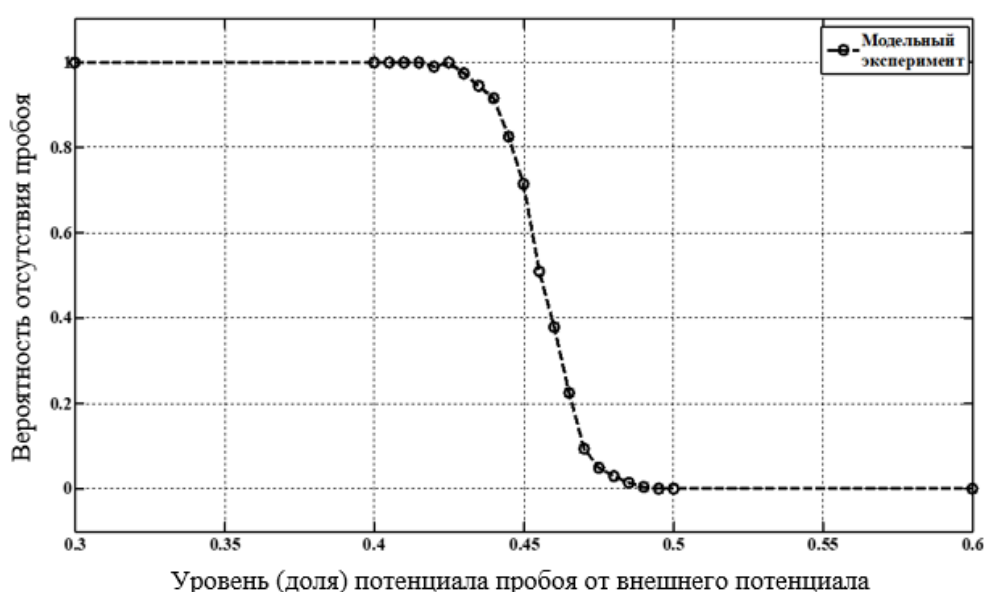


Рис. 3.39. Зависимость вероятности отсутствия пробоя от соотношения между приложенным и граничным потенциалом пробоя

Этот график подтверждается результатами эксперимента с защитной обувью (рис. 3.40).

Человек с закрепленным на нем измерителем потенциала относительно заземления сначала для накопления статического заряда двигался по напольному

покрытию. Этот потенциал не удерживался, поэтому первые 50 отсчетов параметра подвержены значительным случайным вариациям.

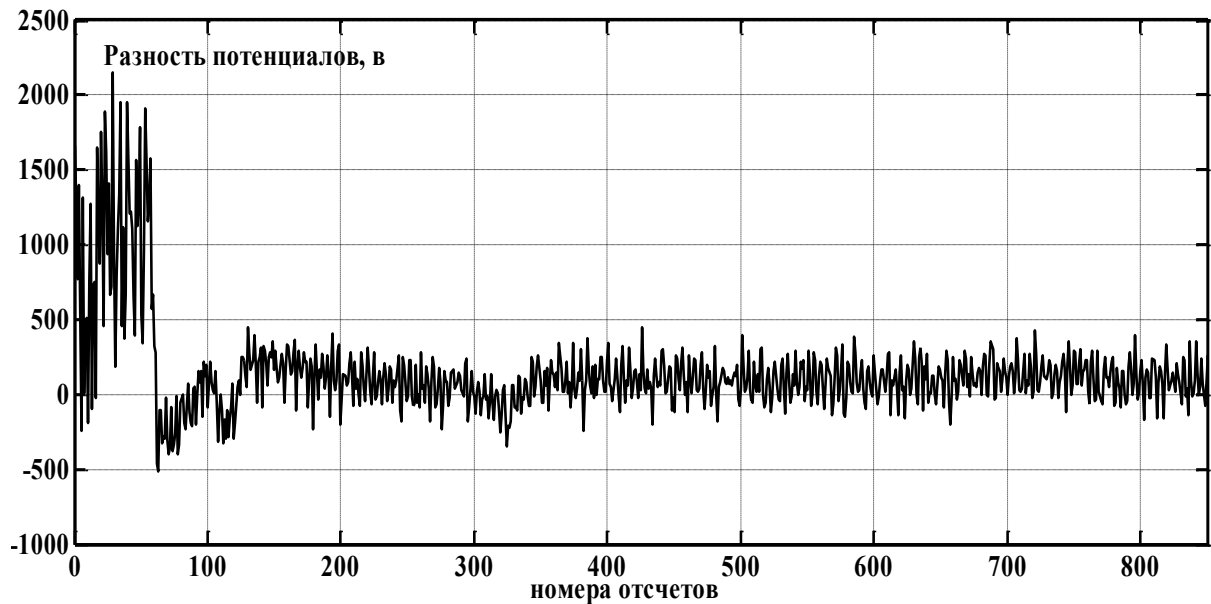


Рис. 3.40. Разность потенциалов между заземленной поверхностью коврового покрытия и одеждой человека

Затем движение по напольному покрытию прекращалось, и накопленный потенциал в виде «тихого» разряда – пробоя стекал от человека к заземлению по наиболее проводящим путям и снижался практически до нуля, причем стекание происходило почти мгновенно, что соответствует высокой, близкой к единице, вероятности пробоя – разряда.

Исследование взаимосвязи неоднородности материала и вероятности пробоя.

С помощью построенной модели выполнено исследование зависимости вероятности пробоя от неоднородности материала. Варьируемым фактором в компьютерном эксперименте выступал коэффициент вариации локального удельного сопротивления участков образца, который принимал значения: $CVr = 0.1\%, 1\%, 5\%, 10\%, 25\%, 50\%$.

При этих значениях коэффициента вариации в компьютерных опытах с моделью исследовались и оценивались значения относительного сопротивления Rc материала вдоль траектории канала пробоя по отношению к его среднему значению

для моделируемого образца, и вариации относительного сопротивления. Количество повторных прогонов модели – 10000 – оказалось достаточным, чтобы для каждого уровня CVr обеспечить не менее чем 95-процентную достоверность оценивания.

Обнаружено, что распределение выборочных значений содержало заметную долю выбросов – «тяжелые хвосты» – и существенно отличалось от нормального закона.

Поэтому для оценки относительного сопротивления R_c нами использованы робастные характеристики: для среднего значения – медиана meR_c , а коэффициента вариации – интердецильный размах относительного сопротивления WdR_c . Результаты оценивания приведены в табл. 3.10.

Табл. 3.10. Зависимость среднего и коэффициента вариации относительного сопротивления вдоль канала пробоя от неравномерности сопротивления материала

$CVr, \%$	meR_c	$Wdr, \%$
0,1	0,9991	7,9665e-005
1,0	0,9915	7,8162e-004
5,0	0,9575	0,0041
10,0	0,9150	0,0080
25,0	0,7872	0,0197
50,0	0,5991	0,0369

Из таблицы следует, что с увеличением неоднородности материала фактическое сопротивление движению электрических зарядов снижается по отношению к средней измеренной величине. Возрастает вариабельность фактического сопротивления. Эти эффекты заметно проявляются лишь при очень больших вариациях удельного сопротивления.

Если материал неоднороден в силу технологии изготовления, например, токопроводящие лакуны, то его фактическое сопротивление существенно меньше сопротивления этого же материала «в чистом виде».

Таким образом, разработанная компьютерная модель протекания потока электрических зарядов сквозь диэлектрический материал, демонстрирует

согласованность с результатами натурных экспериментов по пробое защитных материалов одежды и обуви.

Модель позволяет исследовать влияние особенностей структуры и свойств материала на его сопротивление электрическому пробое. Установлена перколяционная граница вероятности пробоя в зависимости от потенциала внешнего электростатического поля. Исследована зависимость электростатической неоднородности материала от его сопротивления электрическому пробое.

Так как структура обувных материалов, особенно для низа обуви, качественно влияет на динамику процессов, то разработана модель макроскопически неоднородной среды, которая углубит понимание сложных систем и повысит точность анализа.

Модели макроскопически неоднородной среды имеют несколько важных целей и преимуществ – прежде всего это учет неоднородности, повышение точности расчетов, а также прогнозирование поведения систем. Наличие неоднородной структуры может влиять на динамику процессов.

Макроскопически неоднородной средой будем считать среду диэлектрика, в которой наряду со статистической неоднородностью имеется и детерминированная, соизмеримая с размерами того образца, для которого производится моделирование. Например, такая неоднородность может заключаться в дрейфе среднего уровня статистической неоднородности.

Приведем версию модели для неоднородной среды. Для этого строки 4 и 5 скрипта заменим строками

```
A=20; mg=100; sg=10; g0=abs(normrnd(mg,sg,N,M));
```

```
% детерминированная периодическая неоднородность среды
```

```
g1 = A * sin( pi*(0:M-1)/(M/2) );    g2 = A * cos( pi*(0:N-1)/N );
```

```
g3 = g1 * g2;    g = g3' + g0;
```

Строку 12 заменим на строки

```
g0 = abs( mg + sg * randn( N,M ) );    g1 = A * sin( pi*(0:M-1)/(M/2) ); g2 = A *  
cos( pi*(0:N-1)/N );    g3 = g1*g2;    g = g3' + g0;
```

Таким образом, среда имеет неоднородное поле потери энергии $g(x,y)$ для прохода заряда. Эта неоднородность состоит из статистической и периодической детерминированной неоднородностей (рис. 3.41). На рисунке цветом показаны градации уровня проводимости в соответствующей локальной области плоского двумерного материала.

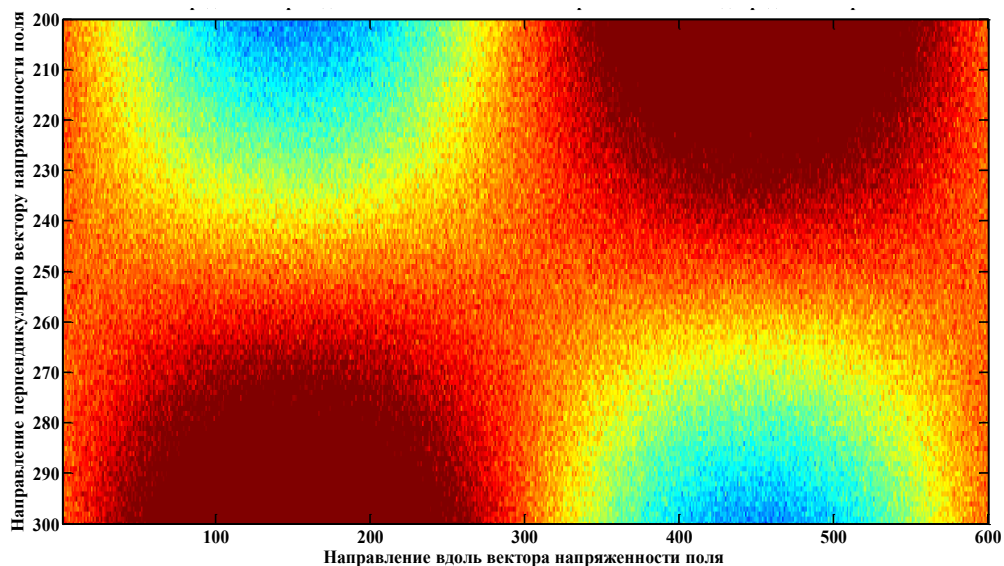


Рис. 3.41. Распределение проводимости в статистически и макроскопически неоднородном материале

На рис. 3.42 показаны пятьдесят вариантов траекторий пробоя с учетом статистической и макроскопической неоднородностей материала.

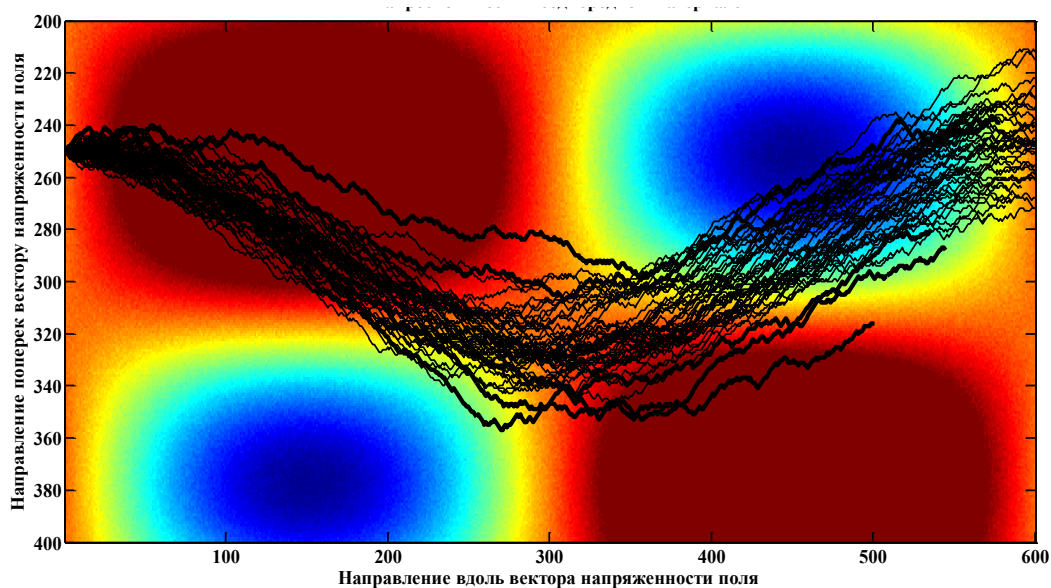


Рис. 3.42. Траектории электрического разряда в статистически и макроскопически неоднородном материале

Утолщенными линиями выделены те, которые вследствие потери начальной энергии зарядов не достигают противоположной границы моделируемого образца материала. Очевидно, что при сохранении эффекта случайного блуждания по объему материала среднее направление траекторий адаптируется к областям с повышенной проводимостью и с меньшими средними значениями потери энергии. В целом, длина траекторий увеличивается.

На рис. 3.43 показано распределение потерь энергии R потоком заряда при пробое, полученное по результатам $N_{prov} = 20000$ повторных прогонов модели.

При оценках по средним значениям энергия, расходуемая на пробой в среднем на единицу длины, равна в относительных единицах, в которых построена модель, $mg = 100$. Как следует из гистограммы, расход энергии, необходимой для пробоя, меньше среднего значения.

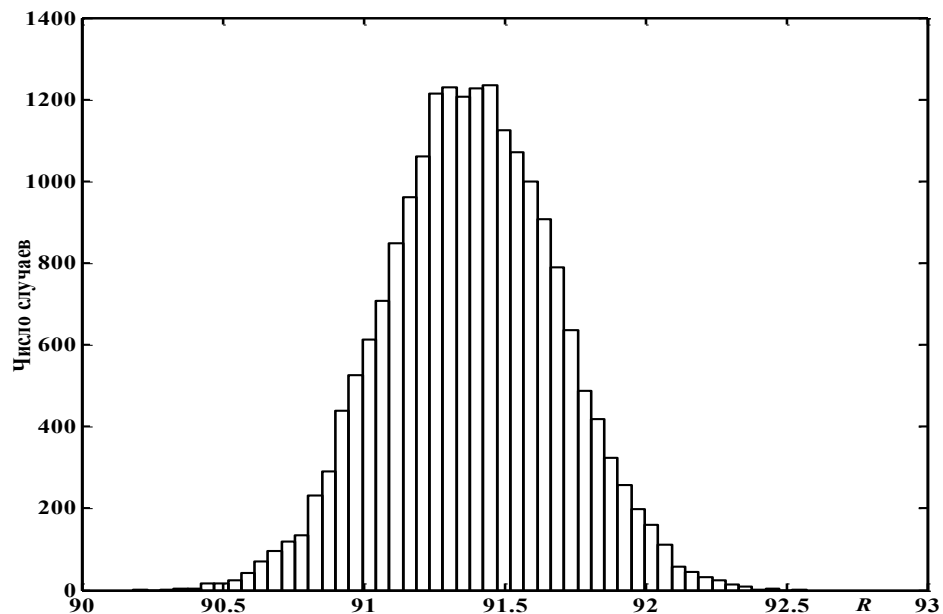


Рис. 3.43. Гистограмма распределения потерь энергии на единицу длины траектории пробоя по 20000 повторным прогонам модели

Оценки числовых характеристик R по гистограмме равны:

$$R_{sr} = 91.3848; \quad SKOR = 0.3039$$

$$R_{min} = 90.1849; \quad R_{max} = 92.5704; \quad cvR = 0.0033.$$

Даже наибольшее среди 20000 реализаций значение потери энергии меньше среднего значения mg . Таким образом, можно сделать вывод, что вследствие

случайных неоднородностей материала энергия, необходимая для пробоя, меньше средней энергии заряда на поверхности материала.

Таким образом, чтобы понять, как меняется траектория прохождения зарядов в среде диэлектрика, мы применяли теорию перколяции, которая позволяет анализировать характер перемещения электрических зарядов через материал, обладающий комплексной структурой с участками, имеющими различную локальную проводимость. Выявлено, что при высокой степени разнородности и фрактальной структуры, которая напоминает лабиринт, состоящий из участков с различными уровнями проводимости создается сложная сеть путей, по которым могут двигаться заряды. Поэтому мы приходим к тому, что одним из способов повышения или понижения сопротивляемости материала пробоем является создание внутри него лабиринта участков с различной локальной проводимостью.

Эта методология позволяет более глубоко понять, как пространство микроучастков и их взаимодействие влияет на макроскопические электростатические характеристики материалов, что может быть крайне полезно для разработки новых полимеров и композитов с заданными свойствами или оптимизации существующих. Таким образом, теория перколяции открывает новые горизонты в изучении электрофизических процессов, происходящих в сложных материалах.

ВЫВОДЫ ПО ТРЕТЬЕЙ ГЛАВЕ

1. Предложена и реализована методика измерения удельного объемного и поверхностного сопротивления обувных материалов. Даны рекомендации относительно подготовки образцов, отражены методические аспекты, которые позволяют повысить точность и надежность измерений.

2. Показано, что такие синтетические материалы, как композитные и ткани с добавлением проводящих волокон, демонстрируют линейную зависимость электрического сопротивления от температуры. Это позволяет предсказывать изменения их свойств при варьировании температуры, что имеет существенное

значение для создания эксплуатируемой в различных условиях обуви. В отличие от синтетических материалов, натуральные, такие как кожа, показали более сложные зависимости (линейные и нелинейные) обусловленные типом обработки и его составом, что подчеркивает их важность при разработке обуви.

3. Установлены корреляционные зависимости антистатических показателей материалов для производства специальной обуви, которые демонстрируют, что оценка электростатической безопасности связана с химическим составом используемых материалов. Эксперименты по измерению напряженности ЭСП и поверхностного электрического сопротивления показали, что показатели большинства образцов соответствуют требованиям стандартов и находятся в допустимых пределах.

4. Впервые проведены измерения электрического сопротивления следующих систем: «специальная обувь – человек – точка заземления», «специальная обувь – человек – напольное покрытие», «специальная обувь – человек – антистатическое напольное покрытие». Выявлена необходимость полномасштабных исследований характера поведения и стекания электростатических зарядов с тела человека в системе «специальная обувь – человек – окружающая среда».

5. Разработан алгоритм расчетной оценки ЭСБ, основанный на математических моделях, который позволяет создавать обоснованные рекомендации по снижению электростатического риска, включая изменения в проектировании обуви, параметрах окружающей и предметно-пространственной среды рабочего.

6. Разработана математическая модель электризации в системе «обувь – человек – напольное покрытие», которая показывает взаимосвязи накопления электростатических зарядов на теле человека от электрического потенциала, наличия обуви и одежды различной диэлектрической проницаемости.

7. Разработана компьютерная модель протекания потока электрических зарядов сквозь диэлектрический материал. Действенность модели подтверждена результатами натурных экспериментов по пробою защитных материалов одежды и

обуви, что доказывает состоятельность исследований влияния особенностей структуры и свойств материала на его сопротивление электрическому пробоя.

8. Установлена перколяционная граница вероятности пробоя в зависимости от потенциала внешнего электростатического поля. Исследована зависимость между электростатической неоднородностью материала и его сопротивлением электрическому пробоя.

9. Разработана модель макроскопически неоднородной среды, которая показывает, что создание участков с различной местной проводимостью может быть реализовано при повышении устойчивости материалов к электрическим разрядам.

ГЛАВА 4. РАЗРАБОТКА МЕТОДА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ И АНАЛИЗА АНТИСТАТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СИСТЕМЫ «ОБУВЬ – ЧЕЛОВЕК – ОКРУЖАЮЩАЯ СРЕДА»

4.1. Общие сведения о моделировании статического электричества на теле человека

Проанализировав основные нормативные документы (см. Главу 1), регламентирующие электростатические показатели обуви, одежды, напольных покрытий и внешней среды; показатели, влияющие на технологические процессы и здоровье человека; электростатические требования к материалам, обуви и одежде, выявлено, что нормируемыми антистатическими показателями чаще всего являются:

- напряженность электростатического поля (E , кВ/м);
- электростатический потенциал (U , В);
- сопротивление (R , Ом).

Измерения электростатических свойств обуви должны проводиться в комбинации с человеком и напольным покрытием. Только в таком сочетании можно достоверно оценить эффективность антистатической защиты. Обратимся к возможностям создания такой модели.

Для измерения электростатических полей в различных климатических условиях используется индивидуальный регистратор-индикатор ИРИ-04М [330] – единственный на современном рынке прибор, который допускает регистрацию электростатического поля и контроль искробезопасности от воздействия статического электричества, выявление причин и условий потенциальной искровой угрозы, обусловленной «человеческим фактором», явлениями природного происхождения и сбоями в работе технического оборудования и электросетей. ИРИ-04М – прибор на базе микропроцессорной техники высокой производительности и точности измерений позволяет автоматизировать процесс

получения данных и их обработку. Сенсор ЭСП – вибрационный датчик, который обеспечивает измерения в интервале температур от - 50 до + 60°С.

ИРИ-04М имеет взрывозащищенное исполнение и применяется в соответствии с установленной маркировкой взрывозащиты, требованиями ГОСТ 31610.0-2019 «Взрывоопасные среды. Часть 0. Оборудование. Общие требования» [331], действующих «Правил устройства электроустановок» (ПУЭ гл. 7.3), «Правил технической эксплуатации электроустановок потребителей» (ПТЭЭП гл. 3.4), других нормативных документов, регламентирующих назначение электрооборудования для взрывоопасных зон [332, 333], а также предотвращения аварийных ситуаций с газонефтепродуктами (пп. 2 и 3 «Правил промышленной безопасности нефтебаз и складов нефтепродуктов») [334].

Различные стандарты проверки радиоэлектронного устройства (РЭУ) на устойчивость к статическому электричеству (СЭ), удовлетворяющей многообразие технических требований сегментов электронной индустрии [335], по степени опасности и физическому происхождению СЭ в уязвимых цепях РЭУ выделяют три категории воздействия его разряда:

- непосредственно на уязвимую цепь при соединении ее с заряженным СЭ телом;
- как результат влияния индукционного (бесконтактного) ЭСП высокой напряженности при перемещениях заряженного СЭ тела относительно цепей РЭУ;
- как реакции контактного или воздушного разрядов СЭ в доступных частях РЭУ (корпус, кожух, экран и т.д.), вызванные интерференцией персонала, механизмов или отдельных узлов оборудования.

Защита от СЭ в цепях РЭУ, как правило, включает в себя набор схем, преимущественно из диодных матриц, ограничительных диодов и стабилитронов.

В стандартах испытаний РЭУ на воздействие СЭ принято использовать модельный подход, который позволяет проводить имитацию разрядов СЭ от персонала (предмета, механизма) с помощью испытательных генераторов,

электрические параметры которых отражают конкретный механизм взаимодействия СЭ и РЭУ.

Возможные взаимодействия вышеперечисленных элементов отражают:

- машинная модель (machine-model – MM) – тестирование РЭУ к СЭ, вызванному механическими устройствами, автоматизированными и промышленными комплексами;
- модель заряженного устройства (charged-device-mode – CDM) имитирует ситуацию, часто возникающую в автоматизированном оборудовании, когда на микросхемах включенных долгое время машин накапливаются заряды, а часть оборудования, приходящая в соприкосновение с заземленным проводником, их разряжает;
- модель человеческого тела (human-body-model – HBM) – наиболее часто используется для характеристики подверженности РЭУ повреждению от электростатического разряда; для оценки восприимчивости к СЭ его электронного компонента путем воспроизводства электрического разряда между человеком и электронным компонентом, который может произойти при прикосновении к устройству.

Наиболее широко распространена HBM – тестовая модель, которая значится в военном стандарте США, MIL-STD-883 как метод 3015.9 Классификация чувствительности к электростатическому разряду [336]. Стандарт предписывает упрощенную эквивалентную электрическую цепь и процедуры испытаний для моделирования события ESD HBM. Неограниченно используется и международный стандарт JEDEC JS-001-2012 [337], аналогом которого является стандарт МЭК 61000-4-2:2008 [338]. Для обеспечения качества электрической энергии и устойчивости цепи к электростатическим разрядам он регламентирует уровень защиты от электростатических разрядов в условиях как прямого, так и непрямого воздействий от оператора на предметы и оборудование, расположенные вблизи технических средств.

На рис. 4.1 представлена эквивалентная схема генератора для проверки радиоэлектронного устройства по модели HBM.

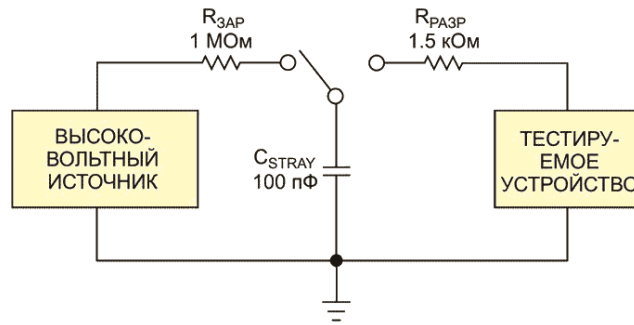


Рис. 4.1. Схема проверки РЭУ по модели НВМ [69]

Для тестирования конденсатор емкостью 100 пФ заряжают от источника высокого напряжения через резистор 1 МОм. После того, как конденсатор полностью зарядится, его переключают от высоковольтного источника с последовательным резистором на схему с резистором 1,5 кОм и проверяемым устройством. Таким образом, напряжение будет сниматься через резистор и устройство. Значение напряжения в зависимости от уровня теста может варьироваться в пределах от 0,5 до 15 кВ. Номиналы емкости 100 пФ и резистора 1,5 кОм соответствуют «электростатическому эквиваленту человека» и приняты на основании усреднения многочисленных измерений.

Так, на рис. 4.2 показана типичная осциллограмма с начальным броском тока порядка 1,5 А и экспоненциальным разрядом конденсатора. Ток А асимптотически достигает 0 примерно через 500 нс.

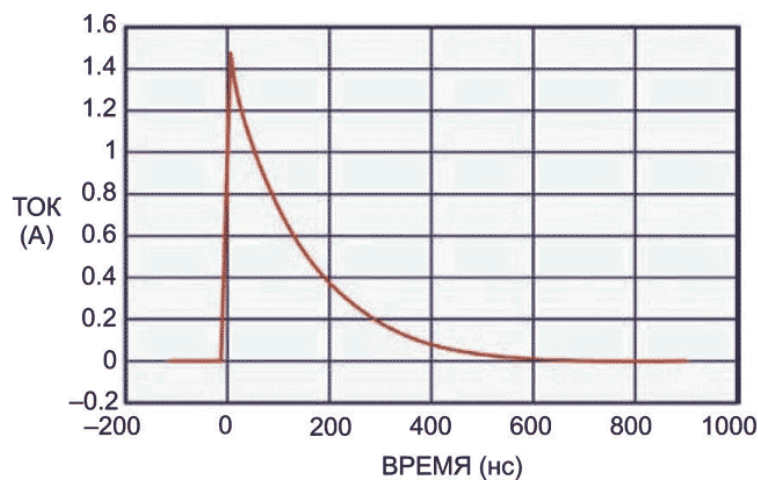


Рис. 4.2. Типичная осциллограмма с начальным броском тока порядка 1,5 А и экспоненциальным разрядом конденсатора [69]

При типичном тесте НВМ одиночным разрядом на проверяемом устройстве может выделяться максимальная мощность до 22,5 кВт.

На основании полученных экспериментальных результатов разработана обоснованная электрическая модель, моделирующая процесс накопления и стекания статических зарядов с тела человека (рис. 4.3), которая представляет собой человека, идущего по непроводящему напольному покрытию в обуви с непроводящей подошвой. В этих условиях электростатический разряд может достичь потенциала около 10000 В. Емкость человеческого тела, выступающего в роли электрического конденсатора, составляет около 200 пФ.

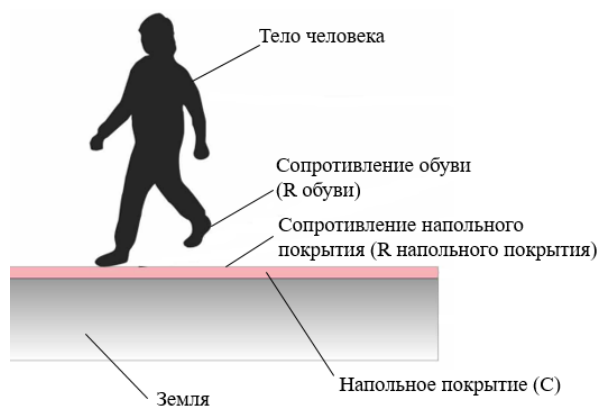


Рис. 4.3. Модель человеческого тела в предметно-пространственной среде [69]

Поэтому, применяя принцип, представленный на рис. 4.4, человеческое тело может накапливать электростатическую энергию около 10 мДж или даже выше, что более чем достаточно, чтобы вызвать воспламенение многих веществ, которые образуют взрывоопасные среды. Исходя из вышесказанного, оценку безопасности специальной обуви под влиянием различных факторов, таких как температура и влажность окружающей среды, напольное покрытие, место размещения регистратора ЭСП, количество слоев одежды и др. можно реализовать при исследовании системы «обувь - человек - напольное покрытие» [183].

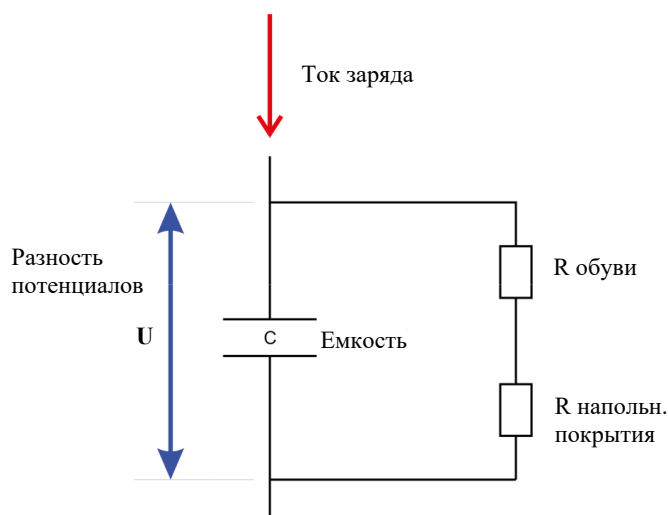


Рис. 4.4. Электрическая модель человеческого тела [69]

Здесь и далее термин «напольное покрытие» предполагает покрытие, на котором перемещается экспериментатор: искусственное – ламинат, линолеум и др.; естественное – грунт, снег и др. Оценка построена на физической модели человеческого тела, которая имитирует возникновение и гашение электростатических зарядов. Это позволило нам разработать методику исследования антистатических показателей системы «обувь - человек - напольное покрытие», которая детально представлена в следующем разделе диссертации.

4.2. Разработка метода и экспериментальные исследования системы «обувь - человек – окружающая среда»

Основой метода исследования системы «обувь - человек – окружающая среда» является регистратор ИРИ-04М (рис. 4.5), который крепится к верхней одежде исполнителя, не мешая ему выполнять свои рабочие задачи [344]. В случае электризации тела человека, верхней одежды или окружающих предметов, ИРИ индицирует степень опасности искрообразования звуковыми и визуальными сигналами, а также регистрирует наличие повышенных значений напряженности электрического поля промышленной частоты, указывая таким образом на потенциальное место неисправности в электропроводке – обрыв фаз и/или цепей заземления, нарушения штатного режима работы электрооборудования.

Требования к техническому персоналу при работе с регистратором-индикатором (см. рис. 4.5) определяются реальными условиями его эксплуатации.

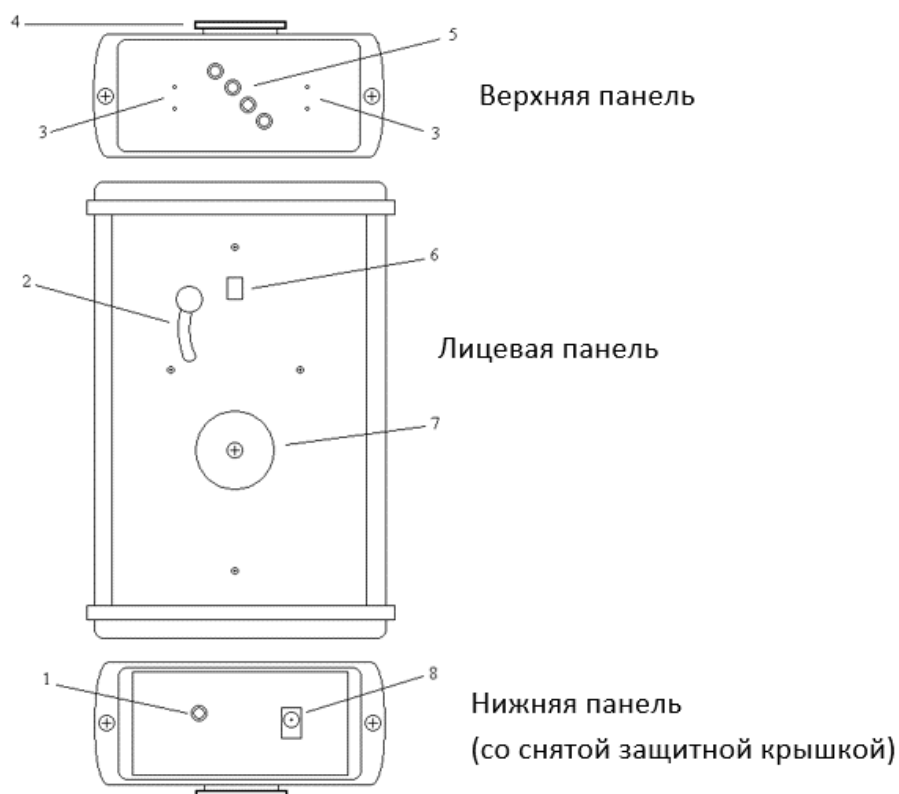


Рис. 4.5. Внешний вид индикатора-регистратора:

- 1 - индикатор заряда встроенных аккумуляторов; 2 - рычаг включения/выключения прибора; 3 - отверстия для звукового и ИК – сигналов; 4 - крепёжная клипса (петля); 5 - индикаторные светодиоды; 6 - окно датчика электростатического поля; 7 - датчик переменного электромагнитного поля; 8 - разъём для подключения зарядного устройства

Собственно испытание для снятия антистатических показателей с объекта исследования состоит из следующих действий:

1. Укрепить регистратор ИРИ-04М на одежде исполнителя.
2. Включить рабочий режим рычагом включения питания 2 (крайнее нижнее положение, шторка преобразователя открыта). При этом поочередно загораются и гаснут все светодиоды 5.
3. Проверить наличие звуковой сигнализации.

4. Проконтролировать работу ИРИ-04М путем внесения его в пространство, где заведомо существует уровень напряженности СЭ и ПЭП, превышающий пороги срабатывания табло.

5. Задать время, в течение которого будет проводиться серия испытаний, и через окно датчика 6 регистрировать показатели электростатического поля.

6. Выключить прибор рычагом включения питания 2 (перевод в верхнее положение, шторка преобразователя СЭ закрыта).

Подготовка к испытаниям:

Условия окружающей среды для выдержки и испытаний.

Если для лабораторных испытаний не установлены специальные требования, то результаты состоятельны при температуре (23 ± 2) °С, относительной влажности (12 ± 3) % окружающей среды и времени выдержки не менее 48 ч. Текстильные напольные покрытия рекомендуется выдерживать до проведения испытаний как минимум в течение 24 ч при температуре (20 ± 2) °С и относительной влажности (65 ± 3) % [14]. Во время предварительной и основной выдержки образцы должны находиться на стеллаже или любой другой поверхности, обеспечивающей свободную циркуляцию воздуха.

При проведении измерений в условиях отсутствия указанных выше параметров окружающей среды, например, на установленных покрытиях, записываются реальные во время испытаний значения температуры и влажности.

Типы напольных покрытий и подготовка образцов для лабораторных испытаний. Для каждого типа покрытия выбирается образец длиной $(2,0 \pm 0,1)$ м и шириной $(1,0 \pm 0,1)$ м. Если покрытие состоит из плиток, необходимо подготовить достаточное их количество для площадки длиной $(2,0 \pm 0,1)$ м и шириной $(1,0 \pm 0,1)$ м. В испытаниях на напольных заземленных при установке покрытиях, общая точка заземления должна быть соединена с образцом, чтобы соответствовать инструкции изготовителя или, если установлены специальные требования к заземлению реально используемого напольного покрытия. Для испытаний на способность накапливать заряды напольные покрытия, которые при установке не заземлены, точки заземления не должны быть подключены к образцу.

Корректные измерения электрического сопротивления незаземленных напольных покрытий не могут быть выполнены в лаборатории. Измерение электрического сопротивления системы «обувь - человек - пол» на полах такого типа следует проводить только после их установки (монтажа). Грязь и посторонние частицы на поверхности напольных покрытий могут существенно повлиять на результаты измерений. Как правило, испытания проводят на напольных покрытиях непосредственно после установки, т. е. уже с нанесенной мастикой и после специальной обработки. Если нет уверенности в постоянстве таких мастик и специальных обработок, то как для лабораторных исследований, так и для установленных полов, образцы перед испытаниями могут быть подвергнуты чистке или практическому износу.

Очистка обуви для лабораторных испытаний и испытаний установленного напольного покрытия. Грязь и посторонние частицы на подошвах могут существенно повлиять на результаты измерений. До испытаний и во время их проведения чистка обуви должна соответствовать нижеприведенным требованиям.

Чистящие материалы:

- шлифовочная бумага зернистостью Р280,
- очищенная хлопчатобумажная ткань (должна быть очищена от мастики и моющих средств),
- этанол (концентрация – не менее 95 %).

Процесс чистки. Очищают каждую подошву обуви от химических веществ чистящей тканью, смоченной в этаноле. При работе с этанолом рекомендуется использовать средства персональной защиты. Когда подошвы высохнут, их следует обработать шлифовочной бумагой и удалить пыль очищенной тканью. Снова протереть каждую подошву обуви новой смоченной в этаноле очищенной тканью. Между измерениями каждую подошву обуви протирают смоченной в этаноле тканью. Следует убедиться, что подошвы тестируемой обуви сухие. Если необходимы измерения обуви в состоянии «как получена» или «как использовалась», этап должен быть пропущен. Для измерений в системе «обувь –

человек – напольное покрытие» регистратор укрепляется на верхней одежде исполнителя и в случае электризации тела, верхней одежды или окружающих предметов, ИРИ индицирует звуковыми и визуальными сигналами степень опасности искрообразования. Диапазон регистрации напряженности электростатического поля от 0,8 до 30 кВ/м [330]. В табл. 4.1 представлены пороговые уровни срабатывания сигналов ИРИ-04М табло.

Табл. 4.1. Уровни срабатывания сигналов ИРИ-04М

Сигналы ИРИ	Уровни срабатывания сигналов		
	зелёный / 1,0	жёлтый / 2,0	красный / 4,0
световое табло / звуковая сигнализация (импульсно-тональный звук с частотой повторения, Гц)			
уровень срабатывания СЭ, кВ/м	0,8 ÷ 1,0	1,5 ÷ 2,0	≥ 3,0

Для передачи записанных значений с ИРИ-04М на ПК использована специальная программа - «IriReader.exe», соединение с которой осуществляет инфракрасный адаптер, связанный с USB-портом ПК. Опишем последовательность действий при передаче данных.

1. Подключить ИК-порт к ПК;
2. Запустить программу IriReader.exe;
3. Расположить ИРИ-04М напротив ИК-порта;
4. Включить ИРИ-04М рычагом включения (прибор должен мигнуть светодиодными индикаторами, это будет означать о наличии связи с ПК);
5. В окне открытой программы должны появиться надпись «Связь установлена» и высветиться «Имя», «Номер», «Время», «Vпит»;
6. Выбрать формат: «Текстовый»;
7. Нажать кнопку «Читать»;
8. Сохранить файл в специально созданной папке, дать ему подходящее имя. Если не нужно другое «имя», то можно оставить автоматически

сформированное, которое несет в себе: текущую дату и время, а также номер записи;

9. Открыть программу «Excel»;

10. Нажать «Файл», затем «Открыть» (обязательно рядом со строкой «Имя файла», выбрать «Все файлы (*.*)», рис. 4.6), иначе не будет возможности выбрать нужный файл);

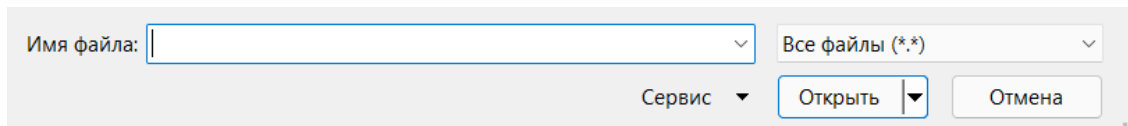


Рис. 4.6. Экранная форма окна «Все файлы (*.*)»

11. Выбрать нужный нам файл из специально созданной папки;

12. Выбрать в высвечивающихся окнах «Мастер текстов» (рис. 4.7) «Далее» (рис. 4.8) и когда дошли до «Шаг 3 из 3» (рис. 4.9), нажать «Готово»;

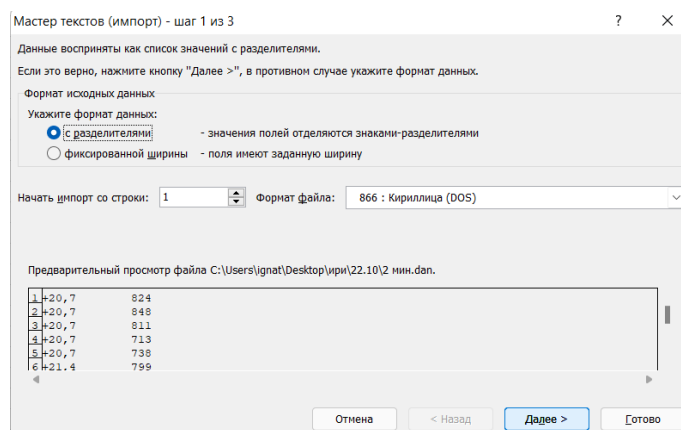


Рис. 4.7. Экранная форма окна «Мастер текстов-шаг 1 из 3»

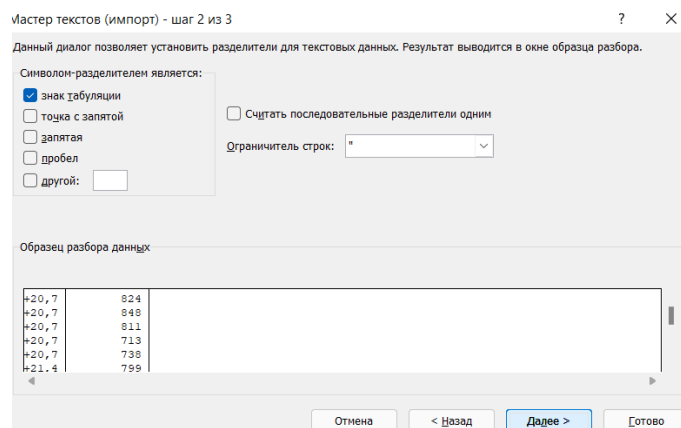


Рис. 4.8. Экранная форма окна «Мастер текстов-шаг 2 из 3»

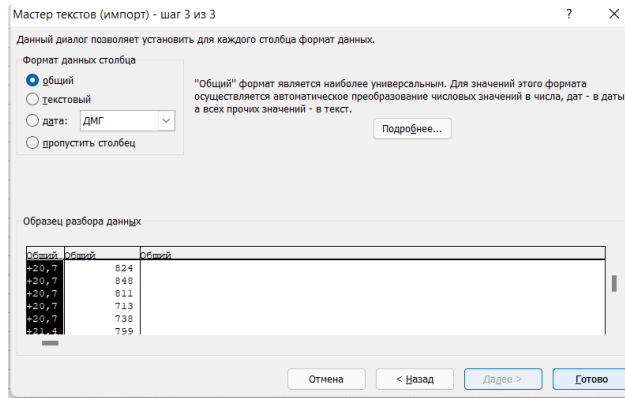


Рис. 4.9. Экранная форма окна «Мастер текстов-шаг 3 из 3»

13. После проведенных действий записанные данные распределяются в 2 столбца (рис. 4.10). В столбце «А» показывается зафиксированная температура окружающей среды, а в столбце «В» - напряжение ЭСП в В/м;

	А	В
1	20,7	824
2	20,7	848
3	20,7	811
4	20,7	713
5	20,7	738
6	21,4	799
7	20,7	861
8	20,7	848
9	20,7	861
10	20,7	934
11	20,7	848
12	20,7	799
13	20,7	1230
14	20,7	3702
15	20,7	5842
16	20,7	5067

Рис. 4.10. Распределенные по столбцам данные

14. Затем строится диаграмма, нажимается кнопка «Мастер диаграмм», выбираются «График» и «Готово». На рис. 4.11 представлен пример построения графика для ЭСП.



Рис. 4.11. Распределение напряжения ЭСП во времени испытаний

На рис. 4.12 представлен пример графика для температуры.

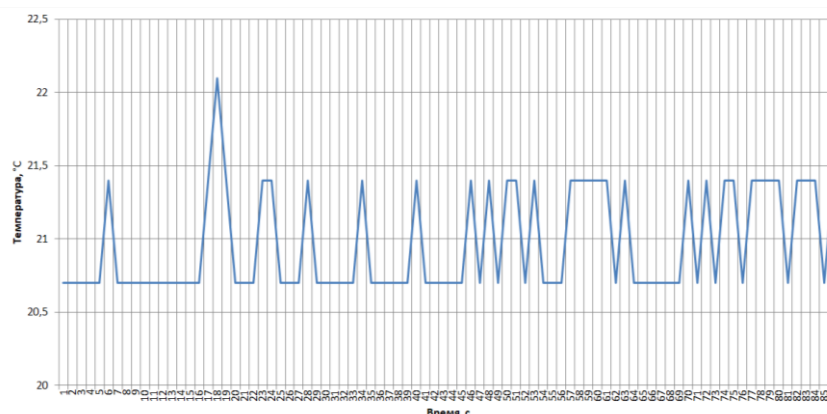


Рис. 4.12. Распределение температуры во времени испытаний

Для определения ЭСП вокруг человека и оценки влияния места расположения прибора ИРИ-04М на теле экспериментатора на конечный результат, проведены испытания, при которых прибор закреплялся на экспериментаторе на различной высоте относительно земли [345]. Схема испытаний: экспериментатор двигался по напольному покрытию с целью накопления электростатического заряда, а затем останавливался на заземляющей пластине для релаксации электростатического заряда.

В ходе исследования выполнено несколько независимых испытаний, и полученные результаты усреднены для уменьшения влияния случайных ошибок и повышения точности. Все испытания проводились при нормальных условиях окружающей среды.

Прежде всего оценивалась напряженность ЭСП в положении прибора на уровне колена экспериментатора [183]. График зависимости напряженности ЭСП от времени представлен на рис. 4.13. Анализируя данные, очевидно, что напряженность колеблется от минус 10 кВ/м до плюс 4 кВ/м. В интервале от 111 до 131 с она остается на одном уровне – 4 кВ/м, что может быть связано с остановкой человека.

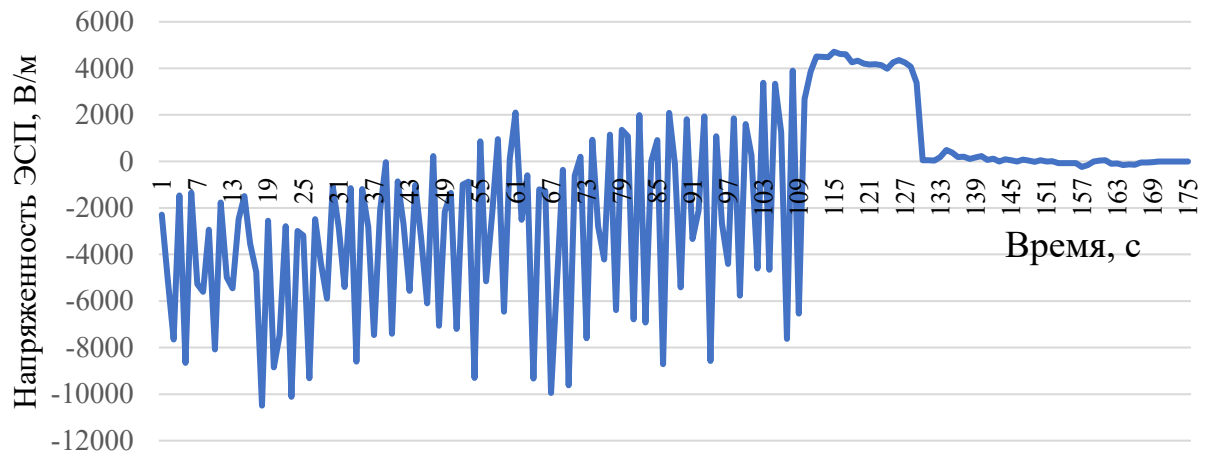


Рис. 4.13. Распределение напряженности ЭСП во времени испытания (прибор закреплен на колене)

После 133 с напряженность спадает – экспериментатор встал на заземленную пластину.

Результаты испытания при закреплении прибора ИРИ-04М на поясе экспериментатора представлены на рис. 4.14.

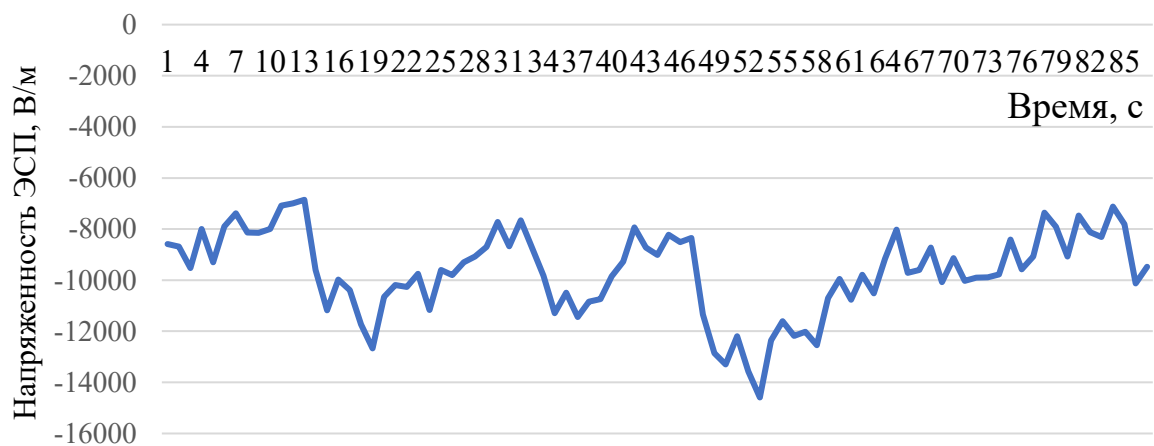


Рис. 4.14. Распределение напряженности ЭСП во времени испытания (прибор закреплен на поясе)

Показатели напряженности ЭСП при закреплении прибора на поясе человека фиксируются только в отрицательной зоне и достигают значений от минус 7 до минус 14 кВ/м. Такое значительное отличие от первого графика объясняется тем, что на поясе человека находится больше одежды, вызывающей большее трение.

При закреплении прибора ИРИ-04М на груди экспериментатора (рис. 4.15) напряженность ЭСП продолжает увеличиваться и достигает значений от минус 12 до минус 16 кВ/м

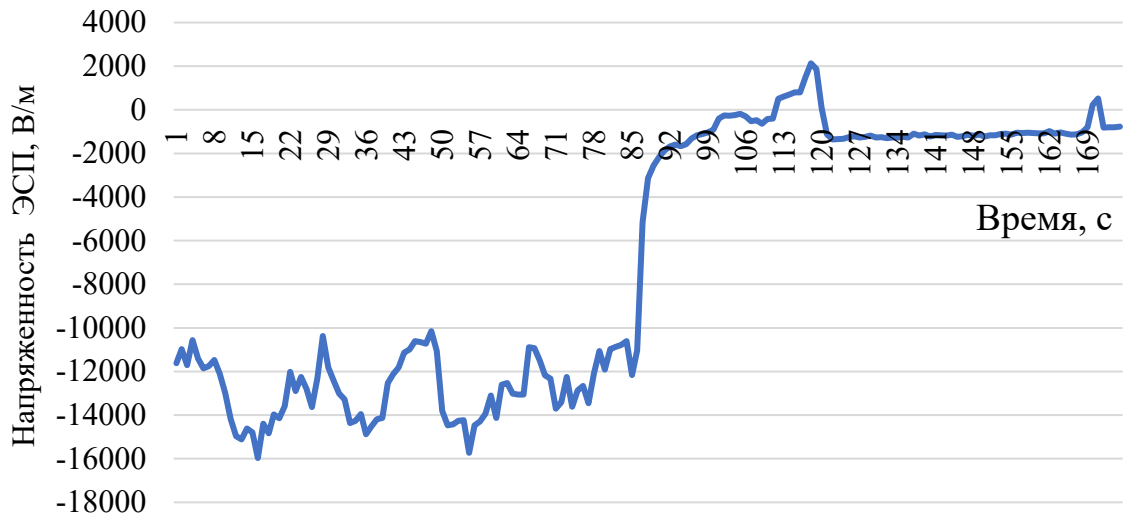


Рис. 4.15. Распределение напряженности ЭСП во времени испытания (прибор закреплен на груди)

Рисунок 4.16 отображает результаты испытаний, при которых прибор ИРИ-04М закреплен около шеи экспериментатора. Напряженность ЭСП при передвижении испытателя уменьшилась и зафиксирована в диапазоне примерно от минус 5 до минус 8,5 кВ/м.

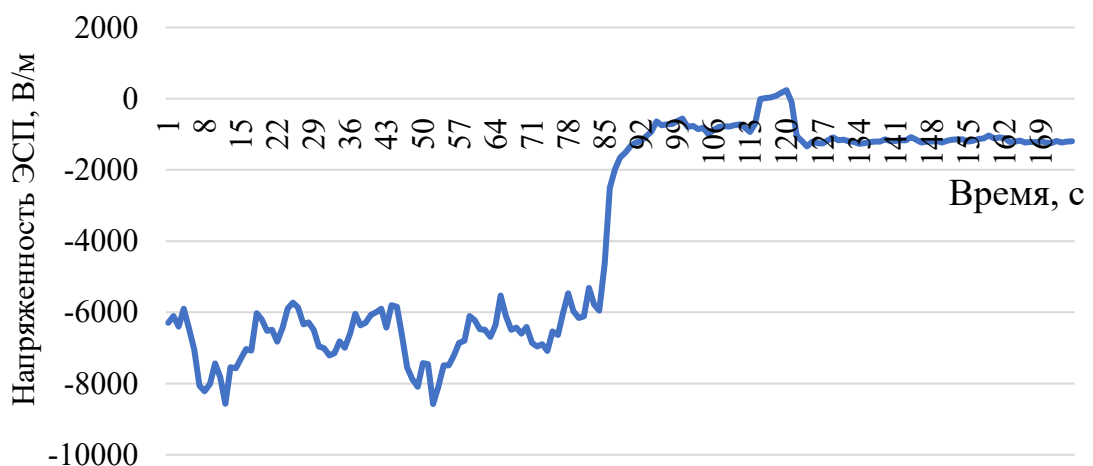


Рис. 4.16. Распределение напряженности ЭСП во времени испытания (прибор закреплен около шеи)

При размещении прибора ИРИ-04М на ладони вытянутой руки экспериментатора получены следующие результаты (рис. 4.17).

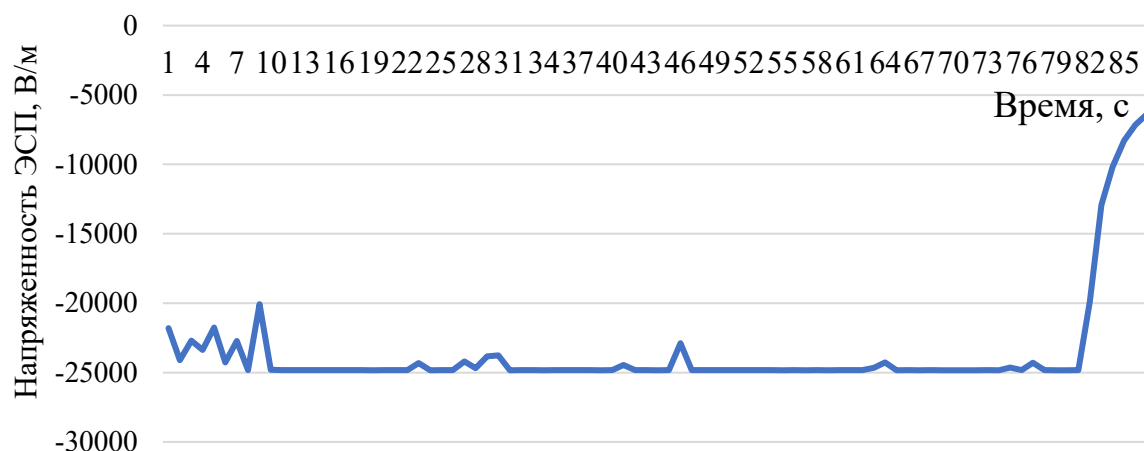


Рис. 4.17. Распределение напряженности ЭСП во времени испытаний (прибор закреплен на ладони вытянутой руки)

Кривая накопления напряжённости ЭСП резко поднимается до минус 25 кВ/м. В этом испытании рука выступает в виде острия и поэтому поверхностная плотность заряда достигает большей величины. Электрическое поле вблизи острия является сильным и резко неоднородным. Напрашивается аналогия с громоотводом. Именно поэтому, напряженность ЭСП максимальна. Визуализация положений прибора ИРИ-04М на теле экспериментатора при проведении измерений представлена на рис. 4.18.

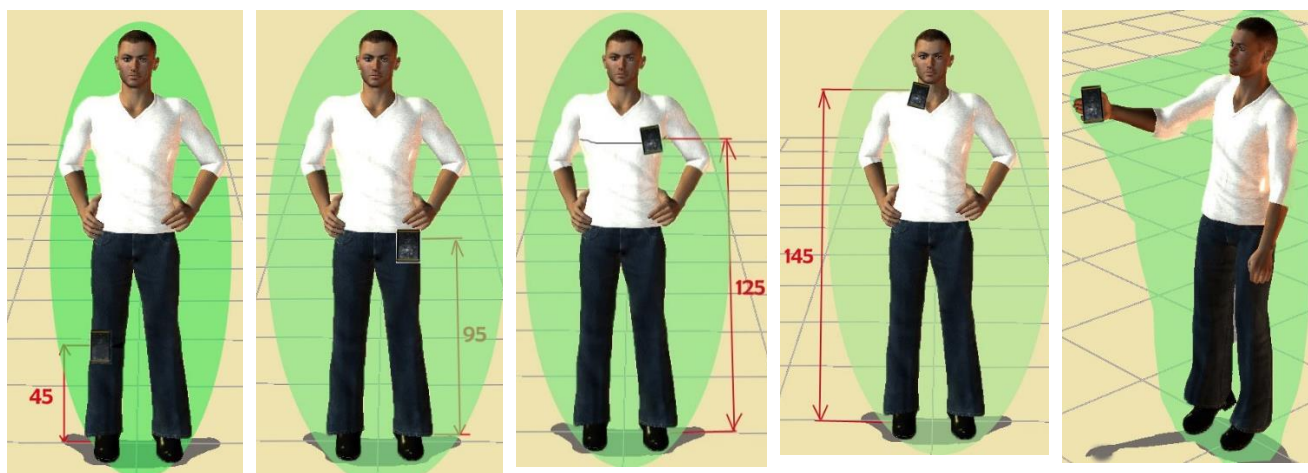


Рис. 4.18. Визуализация положений прибора ИРИ-04М на теле экспериментатора

Полученные данные подтверждают гипотезу о том, что ЭСП вокруг заряженного проводника образуется в форме эллипсоида. Если же присутствует элемент выступающей иглы, то в этом месте фиксируется наиболее сильный заряд.

Результаты испытаний сведены в табл. 4.2 и представлены на рис. 4.19.

Табл. 4.2. Оценка влияния места расположения прибора ИРИ-04М на теле экспериментатора

Расположение ИРИ-04М на теле экспериментатора	Расстояние от напольного покрытия, L, см	Диапазоны и средние значения напряжённости ЭСП по модулю, E, кВ/м
Колено	45	2-6 (4)
Пояс	95	8-14 (10)
Грудь	125	10-16 (13)
Шея	145	6-8 (7)
Вытянутая рука	125	> 25

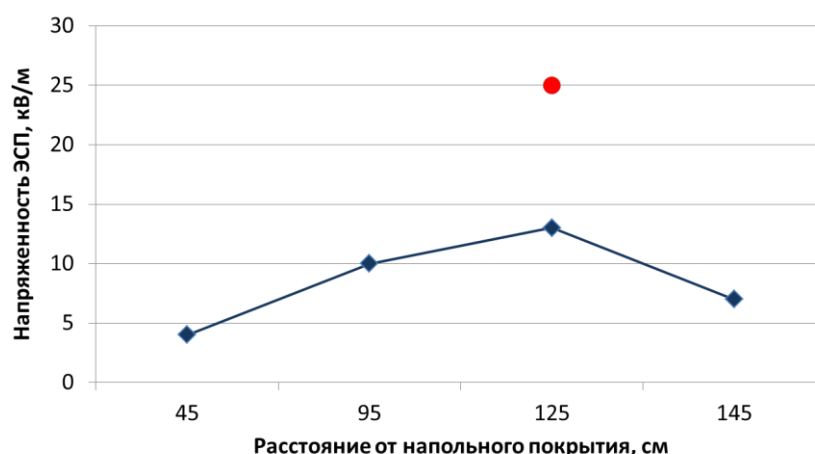


Рис. 4.19. Сводный график влияния места расположения прибора ИРИ-04М на величину напряженности ЭСП

Ниже представим результаты испытаний с различными типами обуви [183]. Серия испытаний проходила по следующей схеме: экспериментатор двигался по напольному покрытию «ламинат» с целью накопления электростатического заряда, а затем останавливался на заземляющей пластине для релаксации электростатического заряда. Во всей серии испытания проводились при постоянных условиях: одежда на экспериментаторе хлопкового состава, напольное покрытие – «ламинат», в помещении при температуре 24-25°C, влажности 50%,

менялся только тип обуви. Установленные данные напряженности ЭСП серии испытаний представлены в таблице 4.3.

Табл. 4.3. Показатели напряженности электростатического поля при проведении серии испытаний

Тип обуви	Максимальные значения напряженности ЭСП, кВ/м	
	отрицательной	положительной
1. Рабочая обувь, низ обуви ПУ/ТПУ	-6 кВ/м	3 кВ/м
2. Повседневная обувь, низ обуви резина	-9 кВ/м	2,5 кВ/м
3. Спортивная обувь, низ обуви ЭВА	-16 кВ/м	2 кВ/м

По полученным показаниям прибора всей серии испытаний нами построены графики распределения напряженности ЭСП во времени испытаний (рис. 4.20-4.22).

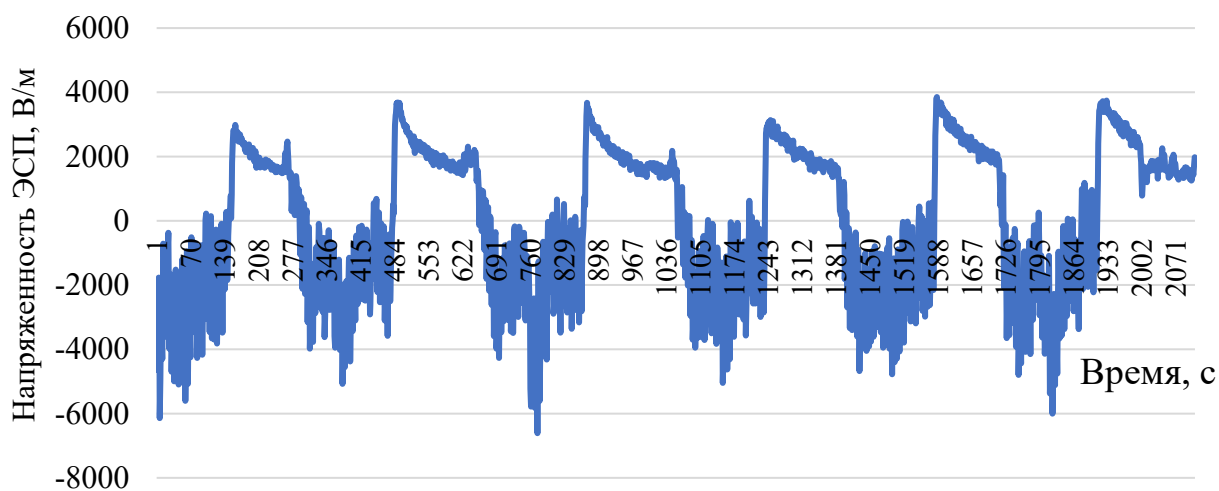


Рис. 4.20. Распределение напряженности ЭСП во времени при испытаниях рабочей обуви

На рис. 4.20 показаны шесть циклов испытаний рабочей обуви. Максимальное значение отрицательной напряженности составляет минус 6 кВ/м. Затем после резкого скачка вверх, вызванного попаданием человека в этот момент на заземляющую пластину, напряжение достигает плюс 3 кВ/м. Увеличение скачков напряжения может быть обусловлено тем, что испытуемый либо касался

своей одежды, либо ускорял движения, вызывая тем самым рост возникающего трения. Циклы испытаний имеют примерно одинаковые значения, что свидетельствует о хорошей повторяемости данных.

На рис. 4.21 очевидны 6 циклов испытаний повседневной обуви. Напряженность ЭСП во всех циклах увеличивается примерно до минус 9 кВ/м и максимальная величина положительной напряженности составляет 2,5 кВ/м. Анализ значений напряженности ЭСП в циклах испытаний показывает их высокую согласованность, что подтверждает хорошую повторяемость данных.

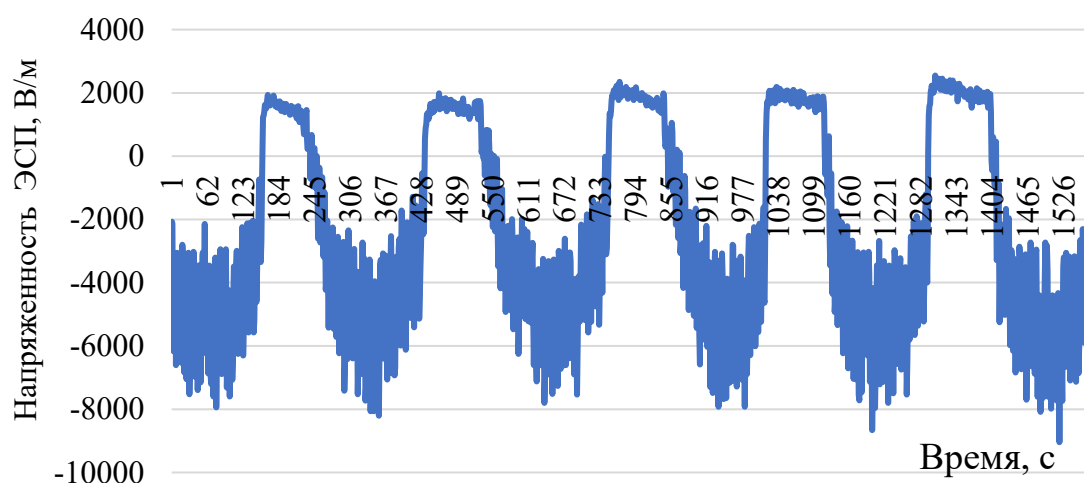


Рис. 4.21. Распределение напряженности электростатического поля во времени при испытаниях повседневной обуви

На рис. 4.22 просматривается 5 циклов испытаний спортивной обуви. Напряженность ЭСП во всех циклах увеличивается примерно до минус 16 кВ/м и средняя положительная напряженность составляет 2 кВ/м.

Таким образом, выявлены уровни напряженности ЭСП для специальной, повседневной и спортивной обуви при передвижении экспериментатора по напольному покрытию «ламинат».

Кроме оценки напряженности ЭСП в различных положениях прибора ИРИ-04М на теле экспериментатора нами установлены ее показатели при изменении числа элементов одежды испытуемого.

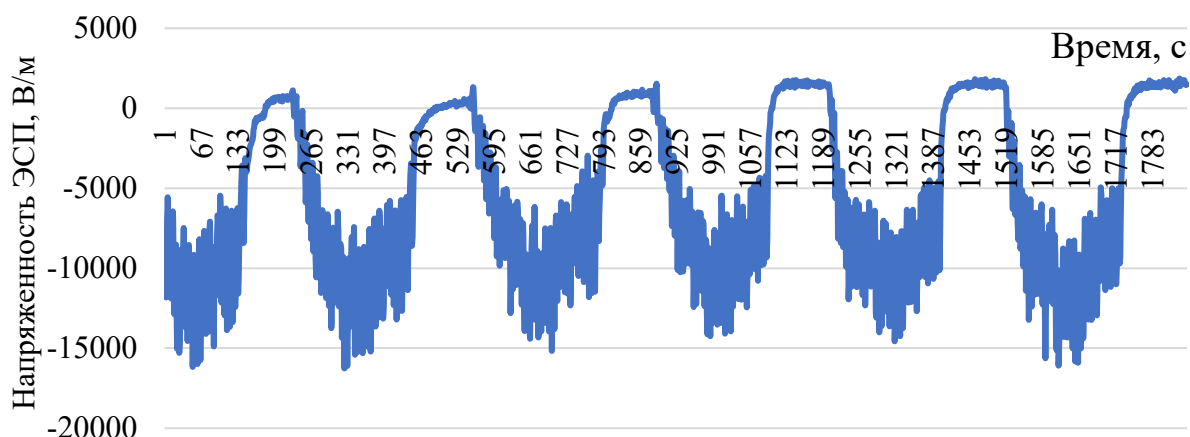


Рис. 4.22. Распределение напряженности электростатического поля во времени при испытаниях спортивной обуви

В данной серии исследования проводились по следующей схеме: экспериментатор с закрепленным на поясе прибором ИРИ-04М двигался по напольному покрытию «ламинат» для накопления электростатического заряда, а затем останавливался в точке заземления для стекания и релаксации электростатического заряда. Измерения проводились в помещении при температуре 24-25°C и влажности 50%.

На рис. 4.23 представлены результаты, когда на теле экспериментатора только один элемент одежды (нижнее белье хлопкового состава). Напряженность ЭСП в момент передвижения в среднем колеблется от минус 1,5 до минус 2,4 кВ/м.

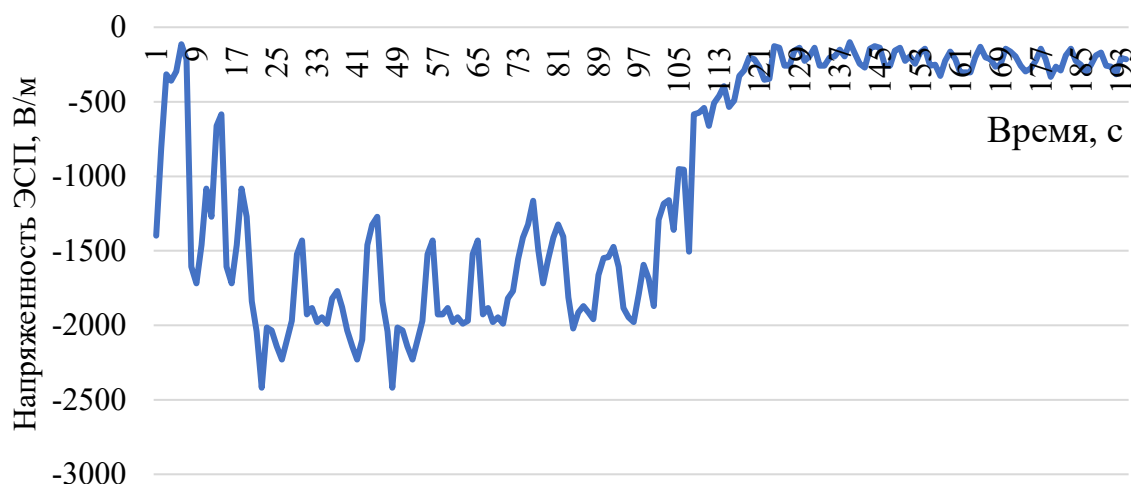


Рис. 4.23. Распределение напряженности ЭСП во времени испытания (один элемент одежды)

На рис. 4.24 представлены результаты, когда на теле экспериментатора два элемента одежды (нижнее белье и рубашка хлопкового состава). Напряженность ЭСП в момент передвижения в среднем составляет от минус 1,0 до минус 2,0 кВ/м.

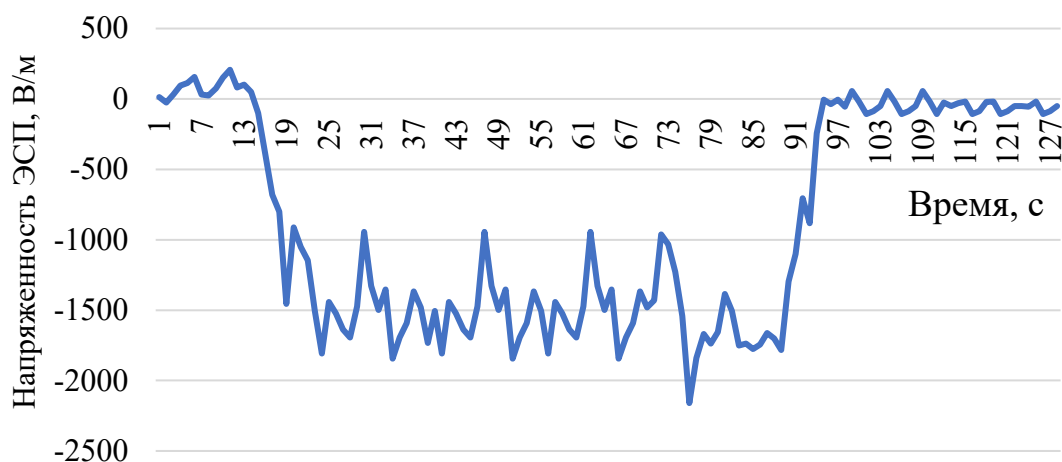


Рис. 4.24. Распределение напряженности ЭСП во времени испытания (два элемента одежды)

На рис. 4.25 представлены результаты, когда на теле экспериментатора три элемента одежды (нижнее белье, рубашка, брюки преимущественно хлопкового состава). Напряженность ЭСП в момент передвижения составляет от минус 1,0 до минус 3,8 кВ/м. После 140 с напряженность спадает – экспериментатор встал на заземленную пластину.

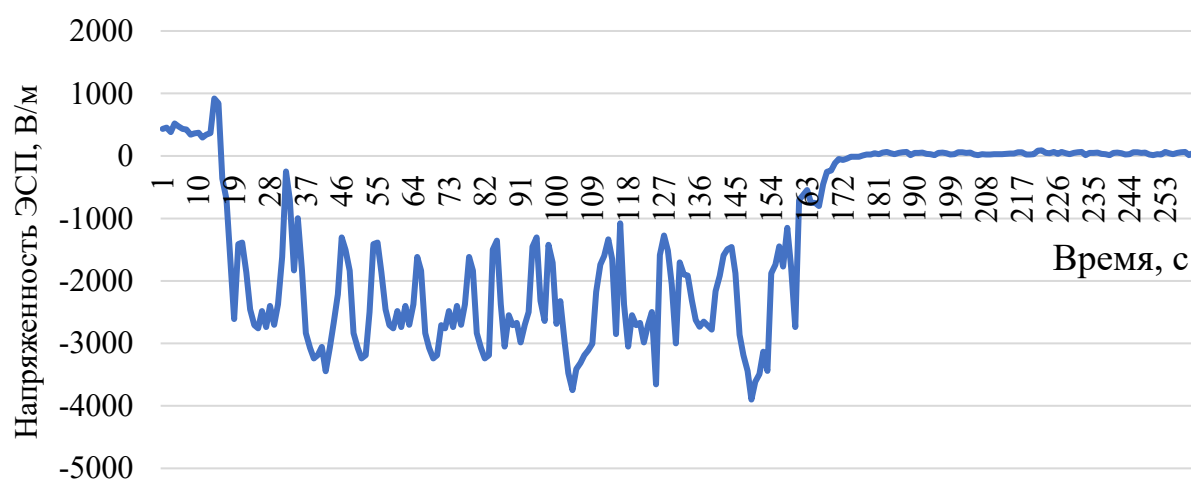


Рис. 4.25. Распределение напряженности ЭСП во времени испытания (три элемента одежды)

На рис. 4.26 результаты измерений, когда на теле экспериментатора четыре элемента – нижнее белье, рубашка, брюки преимущественно хлопкового состава, обувь. Напряженность ЭСП в момент передвижения доходит до минус 25 кВ/м.

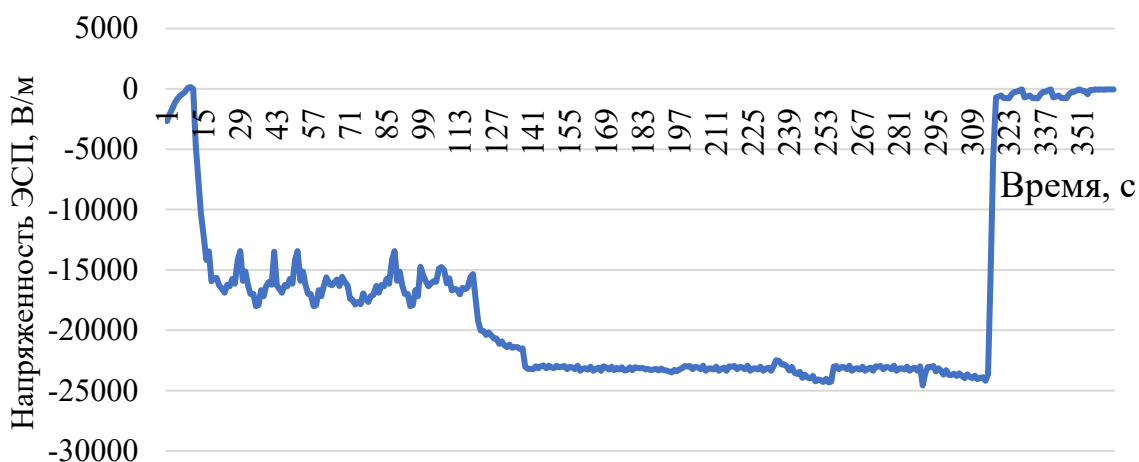


Рис. 4.26. Распределение напряженности ЭСП во времени испытания (3 элемента + обувь)

Полученные данные представлены в виде табл. 4.4.

Табл. 4.4. Значения напряженности ЭСП при варьировании числа элементов одежды экспериментатора

Число элементов одежды	Максимальное значение напряженности ЭСП, кВ/м
1	2,4
2	2
3	3,8
3 элемента + обувь	25

Анализ данных показал, что с увеличением числа элементов одежды на теле человека накопление заряда практически не меняется. При прочих равных условиях наличие обуви на экспериментаторе приводит к резкому скачку напряженности ЭСП, поскольку она способствует не стеканию, а накоплению зарядов. Следовательно, обувь выступила в качестве естественного изолятора.

Для подтверждения полученных результатов проведены идентичные испытания: экспериментатор двигался по напольному покрытию «ламинат» с

целью накопления электростатического заряда, затем останавливался не на заземляющей, на изолированной пластине – заряд стекал менее чем на 50 % и блокировался. Результаты представлены на рисунке 4.27.

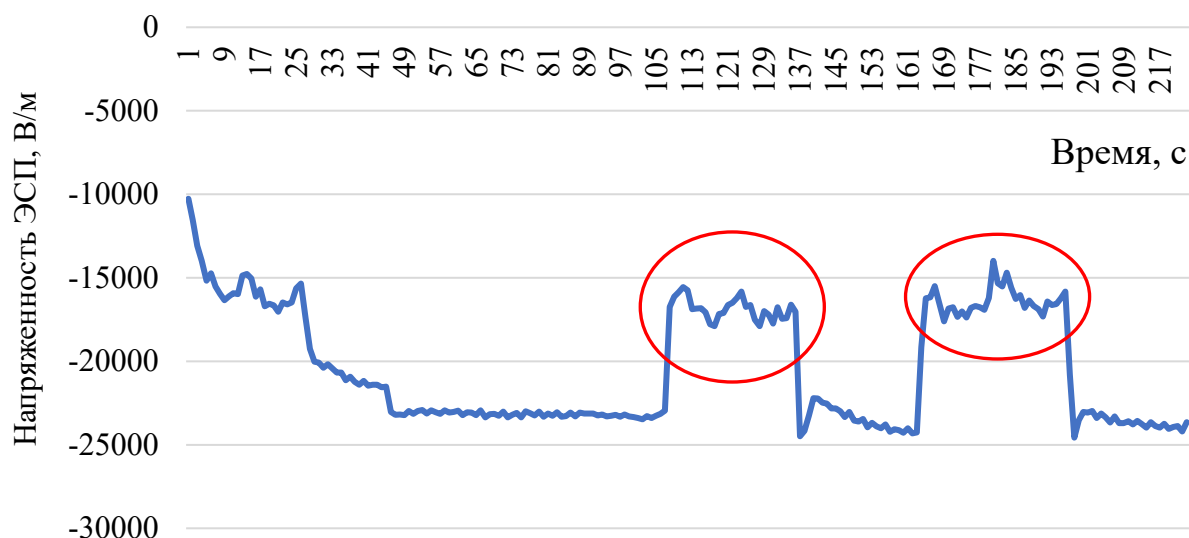


Рис. 4.27. Распределение напряженности ЭСП во времени при остановке экспериментатора на изолированной пластине

Очевидно, что заряд не стекает с экспериментатора при его остановке на изолированной пластине (выделено красными зонами) и напряженность ЭСП падает от 24 кВ/м до 16-17 кВ/м, поскольку воздух практически не проводит электростатические заряды. Таким образом, разработанная методика оценки безопасности специальной обуви позволяет проводить испытания в различных климатических условиях и на разнообразных напольных покрытиях [73, 75, 339, 346, 349]. Выявлено, что накопление заряда значительно возрастает с увеличением числа элементов одежды на теле человека.

Разработанный метод реализует методику исследования антистатических показателей системы «обувь – человек – окружающая среда», которую можно представить в виде алгоритма (рис. 4.28).

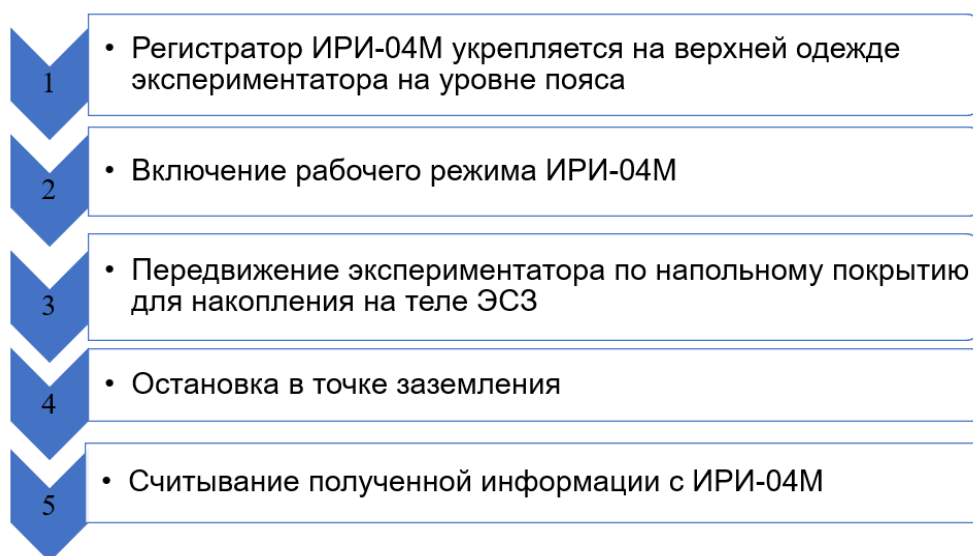


Рис. 4.28. Алгоритм методики исследования антистатических показателей системы «обувь - человек – окружающая среда»

Проведенная предварительная работа с прибором ИРИ-04М, в ходе которой выявлены некоторые трудности, показала, что задачи по установлению причин их возникновения и устранению в последующем могут быть решены при использовании метода Парето [340] – одного из простых и распространенных статистических методов в управлении качеством. Его сущность заключается в классификации проблем качества на немногочисленные, но существенно важные и многочисленные, но несущественные [341].

Различают 2 вида диаграмм Парето [342]:

1 - по результатам деятельности – для выявления главной проблемы и наглядного отражения нежелательных результатов;

2 - по причинам возникновения – для выявления причин, обуславливающих проблемы и выделить главную из них.

Построение диаграмм Парето можно разделить на 9 этапов [342]:

1. Выявление типа проблемы, которую необходимо решить; определение необходимых данных и период фиксации наблюдений; выбор метода.
2. Разработка контрольного листка.
3. Регистрация данных в контрольном листке.

4. Разработка таблицы полученных данных для последующего построения диаграммы.

5. Перенесение значений из контрольного листка в разработанную таблицу для построения диаграммы Парето.

6. Нанесение основных осей диаграммы.

7. Построение диаграммы.

8. Построение кумулятивной кривой.

9. Нанесение всех обозначений и надписей.

Следуя основным этапам, рассмотрим подробнее построение диаграмм для случая оценки результатов измерений показателей ЭСП.

Этап 1. Ежедневно, в течение семи дней проводилось несколько записей на устройство с разными временными промежутками (1,5 мин, 2 мин, 3 мин и т.д.) и температурными значениями окружающей среды с последующим выводом зарегистрированных данных через специальную программу «IriReader.exe».

В ходе работы выявлено следующее:

1) При подсоединении ИК-порта к ПК и ИРИ-04М, программа не устанавливала связь с регистратором.

2) При включении ИРИ-04М не начиналась запись.

3) Продолжительность передачи данных на ПК.

4) Неточность температурных значений.

5) Прочее [340].

Этапы 2 и 3. Разработка контрольного листа и регистрация данных представлены в виде табл. 4.5.

Табл. 4.5. Разработанный контрольный лист с зарегистрированными данными [340]

Проблема:	Частота обнаружений	Число обнаружений	Влияние, %
1	2	3	4
1. Программа не установила связь с ИРИ-04М		28	31%
2. Не включилась запись		10	11%
3. Продолжительная передача данных на ПК		7	8%
4. Неточность температурных значений		39	44%
5. Прочее		5	6%

После внесения зарегистрированных данных в таблицу, отсортируем их по важности (табл. 4.6).

Табл. 4.6. Контрольный лист с зарегистрированными данными, отсортированными по важности [340]

Проблема:	Частота обнаружений	Число обнаружений	Влияние, %
4. Неточность температурных значений		39	44%
1. Программа не установила связь с ИРИ-04М		28	31%
2. Не включилась запись		10	11%
3. Продолжительная передача данных на ПК		7	8%
5. Прочее		5	6%
Всего:		89	100%

Этапы 4 и 5. Для построения диаграммы Парето разрабатывается таблица полученных данных и в неё переносятся значения из контрольного листка (табл. 4.7).

Табл. 4.7. Таблица для построения диаграммы Парето [340]

Проблема:	Число обнаружений	Влияние, %	Суммарное воздействие, %
4. Неточность температурных значений	39	44%	44%
1. Программа не установила связь с ИРИ-04М	28	31%	75%
2. Не включилась запись	10	11%	86%
3. Продолжительная передача данных на ПК	7	8%	94%
5. Прочее	5	6%	100%
Всего:	89	100%	

По полученным данным строим диаграмму Парето. За основу принимаются данные столбцов «Влияние» и «Суммарное воздействие». Этапы работы 6-9 отражены в виде диаграммы (рис. 4.29).

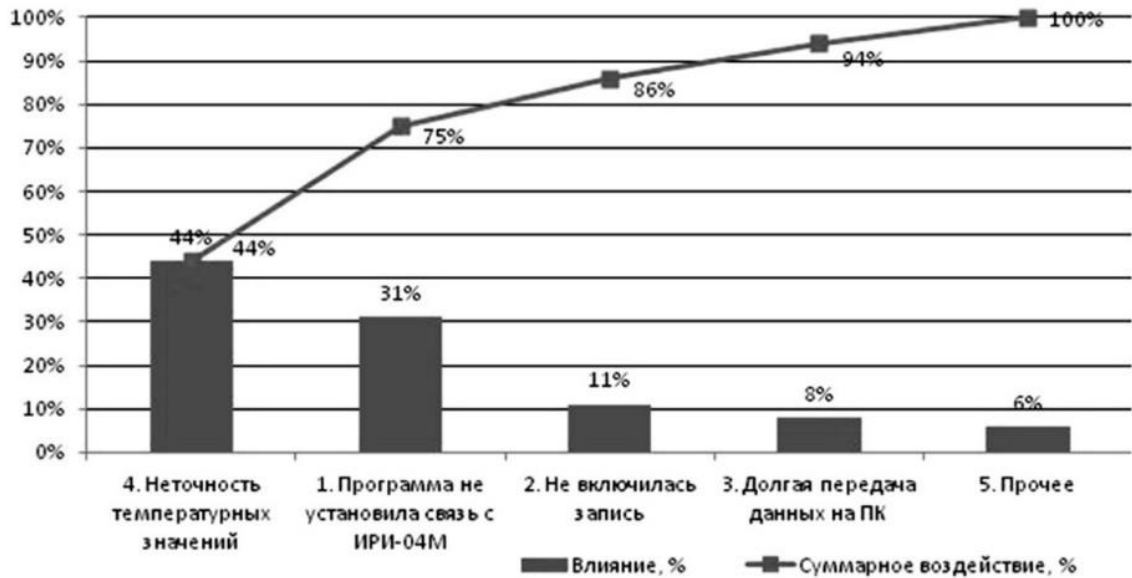


Рис. 4.29. Диаграмма Парето первого вида (по результатам деятельности)

Следуя правилу 80/20 можно сделать вывод, что главными проблемами являются: неточность температурных значений и ошибки программы. Их суммарное влияние составляет 75%.

Ниже приведена диаграмма Парето второго вида (по причинам, рис. 4.30), для проблемы «неточность температурных значений», построенная по данным табл. 4.8 и 4.9 [340].

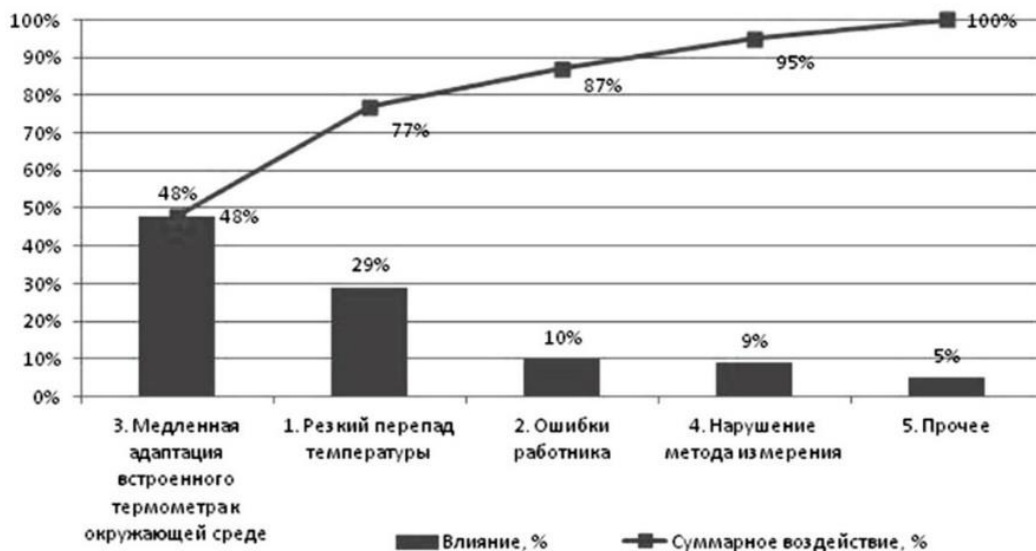


Рис. 4.30. Диаграмма Парето второго вида (по причинам)

Табл. 4.8. Контрольный лист с зарегистрированными данными

Причина:	Число обнаружений	Влияние, %
1. Резкий перепад температуры	37	29%
2. Ошибки работника	13	10%
3. Медленная адаптация встроенного термометра к окружающей среде	61	48%
4. Нарушение метода измерения	11	9%
5. Прочее	6	5%
Всего:	128	100%

Табл. 4.9. Таблица для построения диаграммы Парето с отсортированными по важности причинами

Причина:	Число обнаружений	Влияние, %	Суммарное воздействие, %
3. Медленная адаптация встроенного термометра к окружающей среде	61	48%	48%
1. Резкий перепад температуры	37	29%	77%
2. Ошибки работника	13	10%	87%
4. Нарушение метода измерения	11	9%	95%
5. Прочее	6	5%	100%
Всего:	128	100%	

Из построенной диаграммы следует, что основными причинами возникновения проблем являются медленная адаптация встроенного термометра к окружающей среде и резкий перепад температуры. Суммарное воздействие этих причин составляет 77%, что близко к правилу Парето.

Таким образом, разработан метод оценки антистатических показателей в системе «обувь – человек – напольное покрытие», включающий использование регистратора ИРИ-04М, который обеспечивает эффективную индикацию и регистрацию уровней ЭСП человека и окружающей среды. Эффективность метода подчеркивается различными экспериментами, в которых изучались характеристики ЭСП в системе «обувь – человек – напольное покрытие» при разных параметрах, таких как тип обуви и количество элементов одежды. Результаты показали, что большая часть заряда накапливается при увеличении числа элементов одежды на экспериментаторе, где обувь выступает в роли изолятора, препятствуя стеканию зарядов.

Устранение недостатков и проблем, связанных с измерениями, было достигнуто с помощью метода Парето, который позволяет систематизировать причины возникновения ошибок и разработать стратегии их устранения. Выявлено, что для недопущения неточностей необходим дополнительный прибор – измеритель температуры. Производителю ИРИ-04М можно порекомендовать установить более чувствительный термометр, с быстрой адаптацией к температуре окружающей среды [340].

Таким образом, метод исследования антистатических свойств в системе «обувь - человек - окружающая среда», основанный на использовании регистратора ИРИ-04М, позволяет точно измерять и анализировать уровни ЭСП и их влияние на безопасность и комфорт человека в процессе его взаимодействия с предметно-пространственной средой. Метод позволяет оценить риски, связанные с электризацией, так как ИРИ-04М способен индцировать уровни ЭСП и сигнализировать об опасностях звуковыми и визуальными сигналами, статистическая аккумуляция которых открывает возможности выявлять ситуации искрообразования, сопряженные с потенциальной угрозой для жизни.

Перспективы использования данного метода достаточно широки. Во-первых, его применение возможно в таких сферах, как производство, строительство, нефтегазопереработка, медицина и электроника, где повышенные уровни ЭСП могут привести к серьезным инцидентам или нарушениям функционирования оборудования. Во-вторых, результаты испытаний могут служить основой для разработки новых материалов, технологий и обувных конструкций, направленных на снижение электростатического заряда и повышение безопасности при взаимодействии человека с различными поверхностями.

Также, учитывая результаты, полученные в ходе многочисленных экспериментальных измерений, метод может быть адаптирован и усовершенствован с использованием более современных технологий, таких как IoT-устройства и систем больших данных. Это позволит собирать информацию в режиме реального времени и проводить более глубокий анализ данных, что в свою

очередь может обеспечить не только эффективное управление рисками, но и оптимизацию процессов на производстве.

Следовательно, метод с использованием регистратора ИРИ-04М, предоставляет не только важные данные о состоянии ЭСП в различных условиях окружающей и производственно-пространственной среды, но и открывает новые перспективные научные исследования, значимые для практического применения в различных областях, связанных с безопасностью человека в современном мире.

4.3. Моделирование и экспериментальная оценка электростатических зарядов в системе «обувь - человек - окружающая среда»

После определения основных параметров методика прошла апробацию на двух моделях, сертифицированных как антистатическая обувь, и одной повседневной модели обуви. Характеристики моделей испытуемой обуви представлены в табл. 4.10. Материал низа – везде полиуретан.

Табл. 4.10. Характеристики моделей испытуемой обуви

Вид обуви	Характеристика моделей обуви	Иллюстрация
1	2	3
Модель № 1. Полуботинки повседневные фирмы «ЕССО»	Полуботинки женские, литьевого метода крепления. Материал низа – полиуретан. Материал верха – кожа хромого дубления. Материал подкладки - кожа хромого дубления. Сезон – осень/весна Обувь соответствует: ГОСТ 26167-2005	

1	2	3
Модель № 2. Полуботинки антистатические фирмы «ЦПО»	Полуботинки женские, литьевого метода крепления. Материал низа – полиуретан. Материал верха – кожа хромого дубления. Материал подкладки - кожа хромого дубления. Сезон – лето/осень/весна Защитные свойства – антистатические, от ОПЗ, пыли и грязи, МБС Обувь соответствует: ГОСТ 12.4.124-83 (п. 2.11.1), ГОСТ Р ЕН ИСО 20345-2011 (п. 6.2.2.2), ГОСТ ИЕС 61340-4-3-2020, ГОСТ Р 12.4.187-2024, ГОСТ 28507-90, ТР ТС 019/2011	
Модель № 3. Сандалеты антистатические фирмы «ЦПО»	Сандалеты женские/мужские, клеепрошивного метода крепления. Материал низа – двухслойная, полиуретан. Материал верха – синтетическая кожа. Материал подкладки – текстильный материал. Сезон – лето Защитные свойства – антистатические, от ОПЗ, пыли и грязи, МБС Обувь соответствует: ГОСТ 12.4.124-83 (п. 2.11.1), ГОСТ Р ЕН ИСО 20345-2011 (п. 6.2.2.2), ГОСТ ИЕС 61340-4-3-2020, ТР ТС 019/2011	

Целью последующих сравнительных экспериментов [240, 267, 343] являлось исследование динамики стекания электрического заряда, накопленного на поверхности человеческого тела, при использовании различной обуви в системе «обувь – человек – напольное покрытие» при нормальных условиях эксплуатации согласно ГОСТ ИЕС 61340-4-5-2020 [14]. Исследователь надевал испытываемые модели обуви, одежда на экспериментаторе была преимущественно хлопкового состава.

Каждый опыт эксперимента проводился методом натурной имитации: исследователь, в течение трех-четырех минут ходил по покрытию пола и затем останавливался, пребывая в неподвижном состоянии в течение примерно 10 минут. В первой части опыта, при ходьбе на исследователе накапливался электрический

заряда вследствие трения подошвы обуви о покрытие пола, трения между частями одежды и воздуха. Заметим, что одновременно происходило и стекание части накопленного заряда в «землю», роль которой играло напольное покрытие. Во второй части опыта, когда исследователь был неподвижен, происходило только стекание заряда до некоторого, в среднем, постоянного уровня.

Уровень напряженности ЭСП на исследователе в ходе опыта измерялся прикреплённым к нему регистратором ИРИ-04М. Значения напряженности ЭСП в В/м фиксировались с интервалом в одну секунду и в цифровой форме экспортировались на компьютер.

Всего проведено 7 серий испытаний. Рассмотрим одну из них, в табл. 4.11 приведено соответствие номера опыта типу обуви. Параметры окружающей среды - температура 23°C (± 3), влажность 36 % (± 3) [383].

Табл. 4.11. Соответствие номера опыта типу обуви

№ опыта	Тип обуви	Испытание
1	Модель № 1	1-ое
2		2-ое
3		3-е
4	Модель № 2	1-ое
5		2-ое
6		3-е
7	Модель № 3	1-ое
8		2-ое
9		3-е

В табл. 4.12 приведены фрагменты (первые и последние 10 значений) результатов измерений. Полностью результаты приведены в табл. Г1, Приложение Г.

Табл. 4.12. Фрагменты (первые и последние 10 значений) результатов измерений напряженности ЭСП

t, с	Напряженность ЭСП, В/м								
	Модель № 1			Модель № 2			Модель № 3		
	№ опыта								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	-13020	-18964	-13468	-8663	-5454	-9370	-9146	-8148	-8361
1	-14804	-18631	-16723	-8871	-5907	-8928	-9516	-9349	-8314
2	-16005	-16816	-14710	-7722	-5298	-10743	-6515	-9188	-7852
3	-13977	-18262	-14544	-6936	-4950	-9583	-9464	-8231	-9120
4	-17191	-18371	-15865	-8663	-7373	-7701	-8897	-10784	-8502
5	-17206	-15938	-14679	-9339	-7784	-7176	-7072	-9744	-8299
6	-15220	-16005	-13135	-9854	-4170	-8127	-10966	-10410	-9308
7	-17518	-17825	-16062	-9391	-5792	-7358	-10166	-11003	-6869
8	-18470	-15392	-14440	-7997	-5179	-7976	-9084	-9204	-9245
9	-17612	-17357	-12890	-8512	-4680	-8190	-10930	-9776	-9464
10	-19021	-17643	-15412	-10348	-7280	-6557	-8845	-11902	-8096
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
991	374	462	239	41	-130	98	260	462	1190
992	353	338	369	78	109	228	156	301	920
993	244	187	384	353	-20	130	176	192	1190
994	234	135	452	364	62	156	-62	270	1102
995	332	348	410	156	114	-31	166	275	1055
996	338	473	156	114	130	-150	109	124	1045
997	192	343	343	218	-31	15	-124	10	982
998	145	260	520	20	-182	130	-41	395	1081
999	208	364	234	145	-41	400	260	462	1196
1000	504	327	26	166	197	187	57	249	1024
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮

На рис. 4.31 показаны временные диаграммы, наглядно отображающие динамику напряженности ЭСП в девяти опытах.

Знак накопленного заряда во всех опытах – отрицательный. Поток данных во всех опытах содержат заметную случайную составляющую, природа которой связана с хаотичностью накопления и стекания заряда [383]. На первом этапе – накопления заряда – в большинстве опытов наблюдаются несколько периодов колебаний его уровня с примерно одинаковой частотой. Второй этап – стекания заряда – в разных опытах происходит с разной скоростью, но во всех опытах завершается значительно раньше срока окончания измерения и регистрации данных.

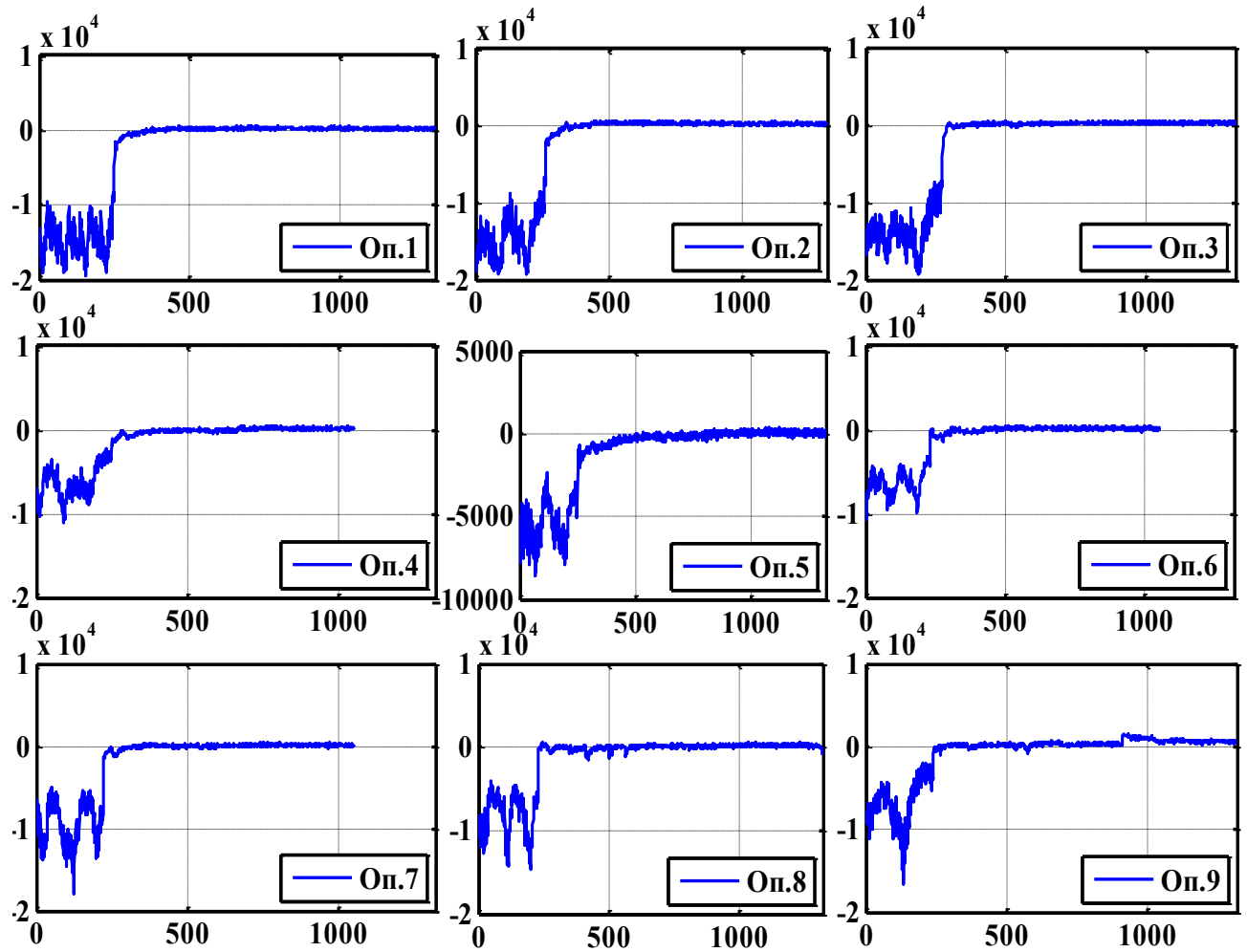


Рис. 4.31. Временные диаграммы динамики накопления и стекания заряда

Граница между двумя этапами, формально установленная на рубеже 180 с, в разных опытах является размытой и требует уточнения. Для более детального исследования структуры, содержания результатов, установления их связи с варьируемыми в эксперименте параметрами и условиями опытов, имеет смысл построить математические модели данных.

4.3.1. Разработка математической модели опытных данных

Полученный объем экспериментальных данных системе «обувь – человек – напольное покрытие» допускает провести моделирование, главной целью которого являлось оценка границы между этапами опыта t_c в автоматическом режиме. Эта оценка позволяет оптимально разделить поток данных каждого опыта на

относящиеся к каждой части. Такое разделение, в свою очередь, допускает более детальное исследование структуры и свойств всех элементов эксперимента. В качестве модели данных используем нелинейную (по коэффициентам регрессии) регрессионную модель $Y_p = \Phi(a, t)$. В этой модели Y_p – зависимая переменная – измеряемый потенциал, a – вектор параметров модели - коэффициентов регрессии, t – аргумент регрессионной зависимости – время в секундах от 0 до момента завершения опыта. С учетом цели построения модели выберем ее аналитическую форму в виде:

$$a(1) = tc$$

$$Y_p(t) = \begin{cases} a(2), & \text{если } t < tc \\ a(3) + a(4) \cdot \exp(-a(5) \cdot (t - tc)), & \text{если } t > tc \end{cases} \quad (4.1)$$

Модель означает, что на первом этапе вариациями напряженности ЭСП пренебрегаем и заменяем их усредненным значением $a(2)$. Граница между этапами задается в модели как параметр $a(1)$. Для второго этапа принято, что во времени при стекании заряда напряженность убывает по экспоненциальной зависимости, причем начальное ее значение равно сумме параметров $a(3) + a(4)$, а к окончанию стекания заряда конечное значение равно $a(4)$. Скорость стекания определяется параметром $a(5)$. Параметр $a(1)$ имеет размерность [секунда], параметры $a(2)$, $a(3)$ и $a(4)$ имеют размерность [Вольт/м], параметр $a(5)$ имеет размерность [секунда]⁻¹.

Для подбора оптимальных оценок вектора параметров a используем критерий наименьших квадратов

$$Wq(a) = \frac{1}{Te} \sum_{t=0}^{Te} (y(t) - Y_p(a, t))^2 \rightarrow \min_a \quad (4.2)$$

где $y(t)$ – значения потока данных о потенциале, полученные в опыте.

Поскольку эта задача для нелинейной регрессии, то выполним поиск оптимальных оценок параметров – коэффициентов регрессии – численно, используя хотя и медленный, но практически универсальный метод адаптивного случайного поиска (Adaptive Random Search, ARS) [121, 126, 127]. Это алгоритм

оптимизации, который сочетает элементы случайного поиска и адаптации в процессе поиска. Метод используется для нахождения оптимальных решений в сложных многомерных пространствах параметров, где традиционные методы могут быть менее эффективными. Метод адаптивного случайного поиска представляет собой мощный инструмент для решения сложных задач оптимизации, при этом выдает более высокую точность, чем при обычном поиске. Ниже приведен алгоритм поиска оценок коэффициентов регрессии.

Пользовательская функция

$Y = MyF(a; T_e)$

$t_c = a(1);$

Для всех $t = 0 : 1 : T_e$

если $t < t_c$, то $y(t) = a(2)$,

иначе $y(t) = a(3) - a(4) * \exp(-a(5) * (t - t_c))$

end

Случайный поиск

/ задание параметров и начальных значений

$T_e = 1000; a_s(1) = 180; a_s(2) = 15000; a_s(3) = 1000; a_s(4) = 15000; a_s(5) = 0.01;$

$N_p = 50000; CVa = 0.1; W_{opt} = 10^9; t = 0 : T_e; \text{plot}(t, y)$

$a_{opt} = a_s; y_p = MyF(a_{opt}; T_e);$

/ начало поисковых циклов

Для $p = 1 : N_p$

{ $W = (y - y_p) * (y - y_p) T / T_e;$

Если $W < W_{opt}$, то $a_{opt} = a; W_{opt} = W;$

/ генерация адаптированных пробных случайных значений параметров

$a(1) = Un(0.1 * a_{opt}(1); 2 * a_{opt}(1));$

$a(2:5) = Norm(a_{opt}(2:5), CVa * a_{opt}(2:5));$

$Y_p = MyF(a; T_e)$

}

/ вывод графиков $y(t)$ и $Y_p(t)$

Алгоритм реализован языковыми средствами системы Matlab [122]. На рис. 4.32 – 4.36 в качестве примера показаны результаты работы алгоритма для данных 1-го, 4-го, 5-го, 7-го и 9-го опытов. Рассчитаны оптимальные оценки коэффициентов регрессионной модели, время оптимизации 67 сек. Очевидны заметные различия в деталях аппроксимации.

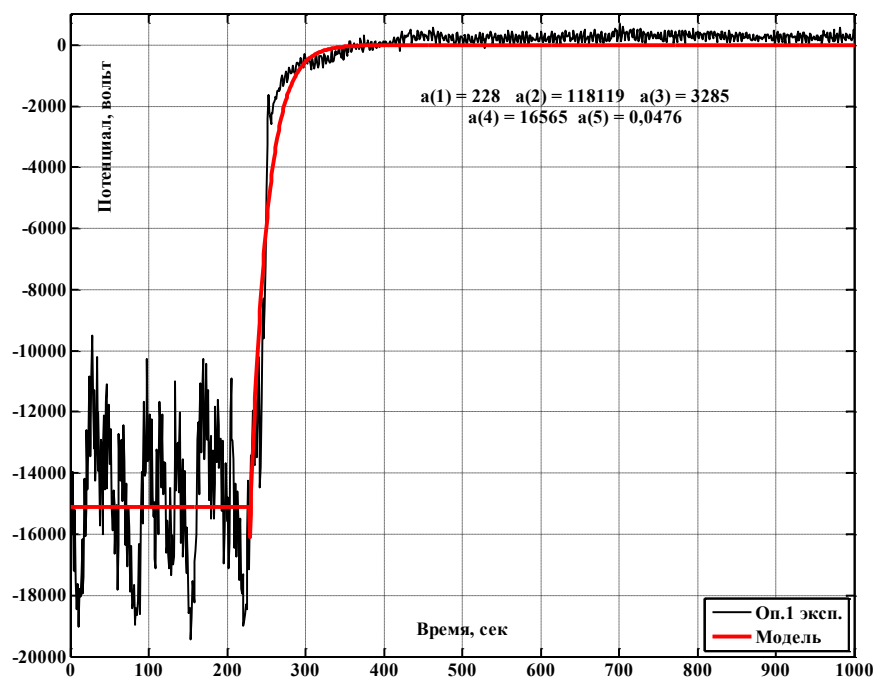


Рис. 4.32. Экспериментальные и модельные результаты опыта 1

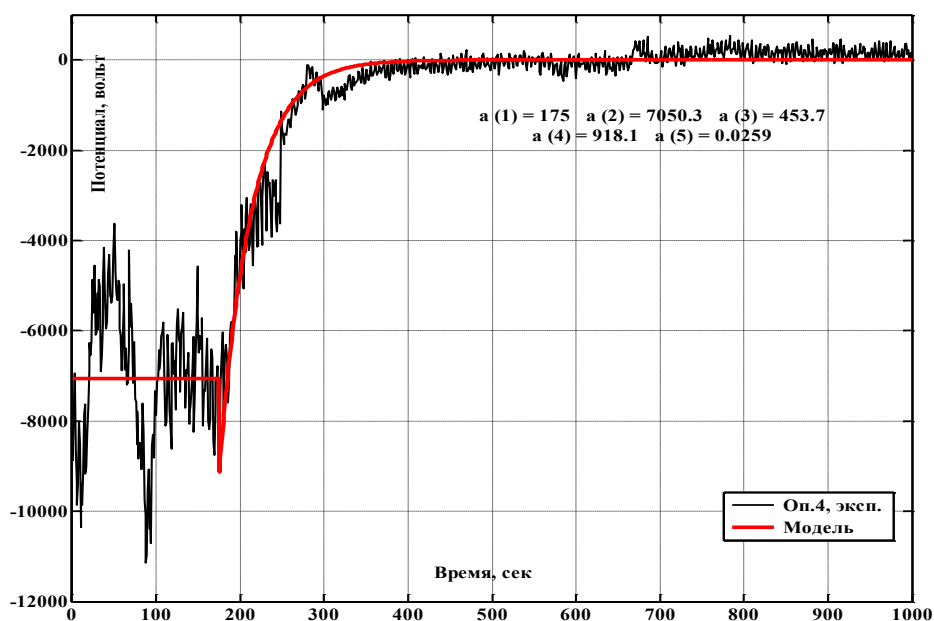


Рис. 4.33. Экспериментальные и модельные результаты опыта 4

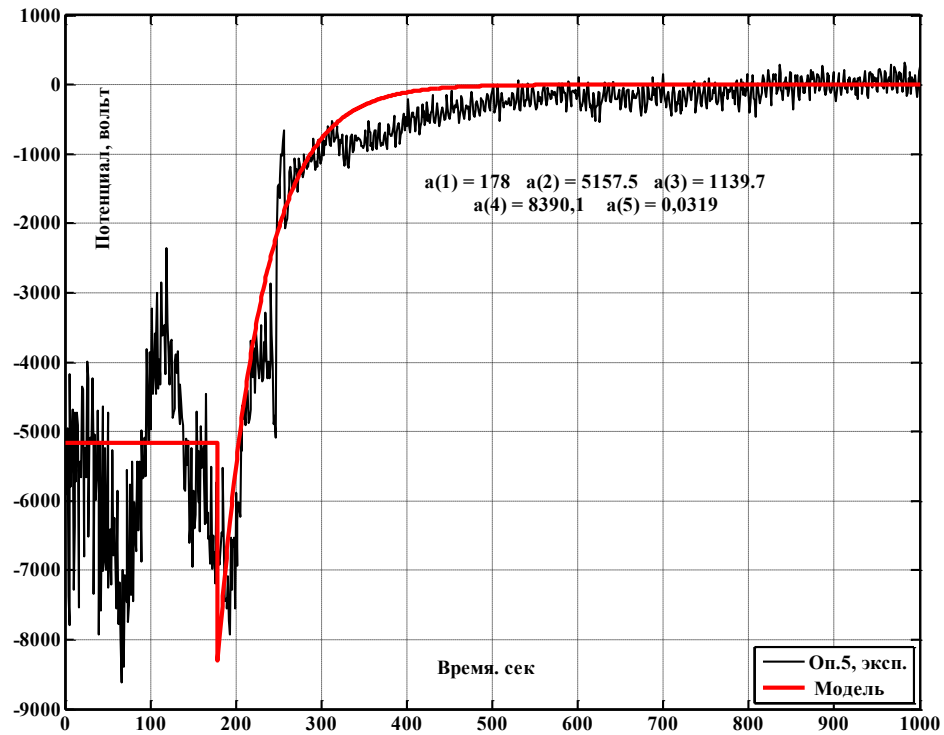


Рис. 4.34. Экспериментальные и модельные результаты опыта 5

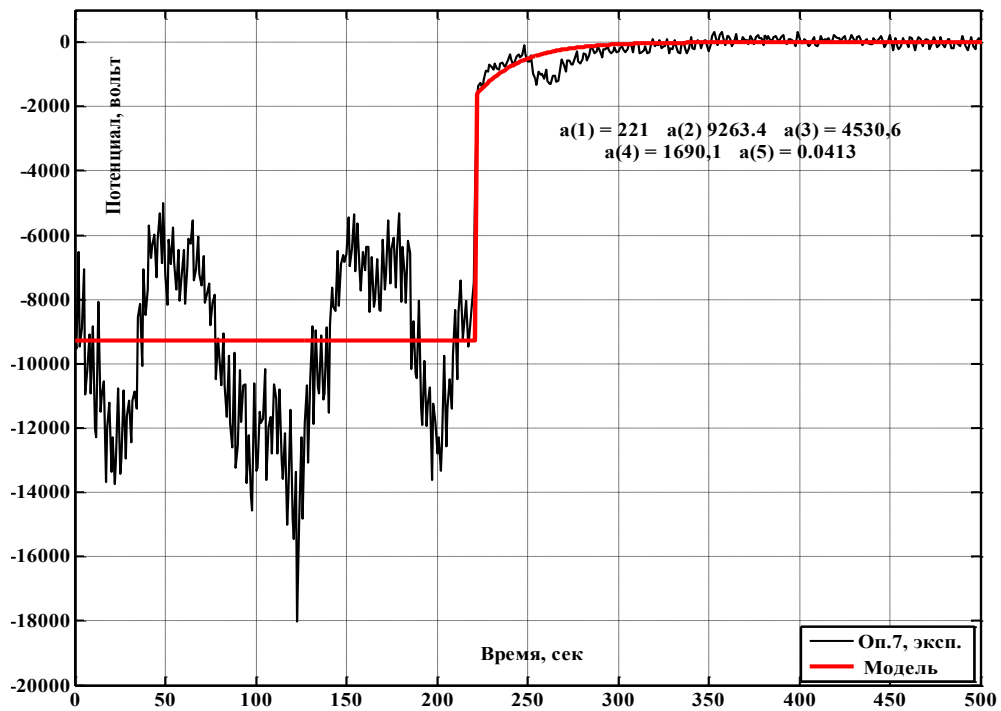


Рис. 4.35. Экспериментальные и модельные результаты опыта 7

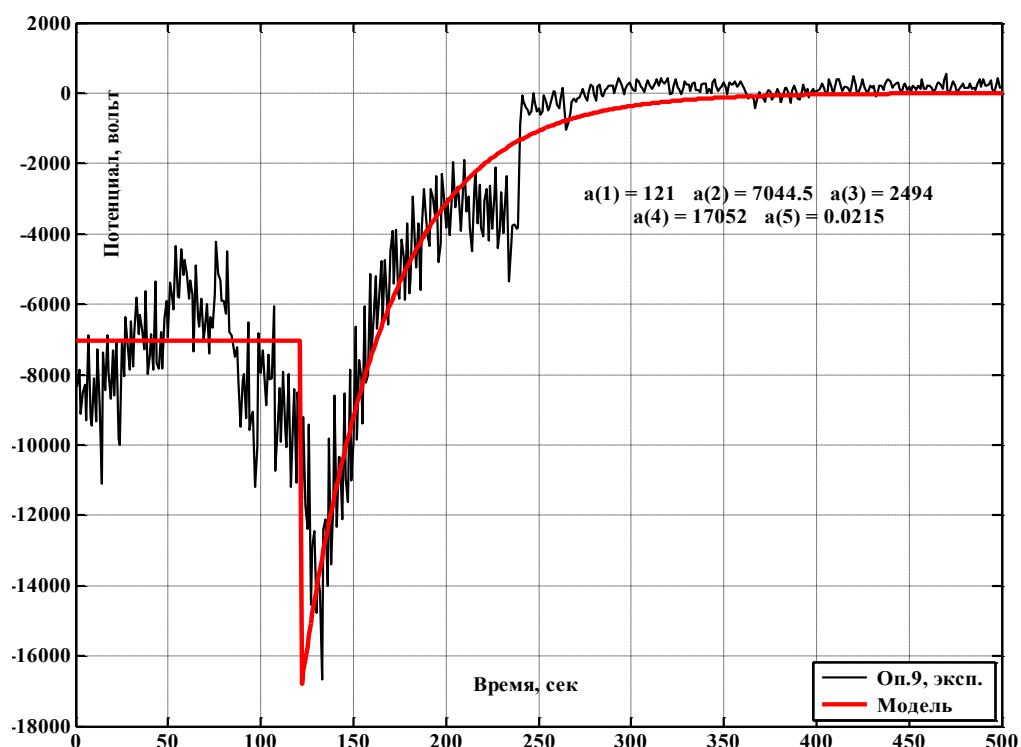


Рис.4.36. Экспериментальные и модельные результаты опыта 9

Ниже в табл. 4.13 приведены сводные результаты оценки параметров - коэффициентов регрессионных моделей для всех 9 опытов.

Табл. 4.13. Результаты оценки параметров - коэффициентов регрессионных моделей для всех 9 опытов

№ опыта	a(1)	a(2)	a(3)	a(4)	a(5)
1	228	11812	3285	16565	0,0476
2	232	14887	662.4	13007	0,0310
3	223	14617	913,1	16811	0,0276
4	175	7050	453,7	918,1	0,0259
5	178	5157.5	1139.7	8390.1	0,0319
6	203	6642.7	4535.9	5683.5	0,0431
7	221	9263.4	4520.6	1690.1	0.0413
8	186	8019.2	4118.7	16808	0,0331
9	121	7044.5	2494.0	17052	0,0215

Экспериментальные и модельные результаты всех семи серий испытаний представлены на рис. Д1- Д62, Приложение Д.

Регрессионные модели для всех серий экспериментов, а также показатели верхнего среднего уровня заряда, время стекания заряда, коэффициент достоверности регрессии представлены табл. Е1, Приложение Е.

Проведем статистический анализ динамики накопления заряда. Коэффициент регрессии $a(1)$ дает оценку времени завершения накопления заряда. Это позволяет разделить поток данных в каждом опыте эксперимента на два в соответствии с этапами опыта. Рассмотрим сначала данные опытов для первого этапа. Графики этой части данных можно увидеть на рис. 4.31. Их отображают левые части кривых.

Проверка на наличие тренда показала, что, если в этих данных и присутствует монотонно изменяющаяся компонента, то на нее приходится не более 15% всей вариабельности переменных. Проверка этих же данных на их случайность с помощью тестовых процедур знаков (signtest) и серий (runstest) пакета Matlab [122] показали, что эти потоки данных нельзя трактовать как случайные, т.е. в них присутствуют неслучайные составляющие. Таким образом, их можно заменить стационарными временными рядами.

4.3.2. Корреляционный и спектральный анализы динамики накопления электростатических зарядов

Для обнаружения закономерностей в стационарных временных рядах вычислим оценки их нормированных автокорреляционных функций (АКФ) по известным формулам:

$$Ry(\tau) = Ky(\tau) / Sy^2 \quad (4.3)$$

в которых:

$$Sy^2 = \frac{1}{T} \sum_{t=0}^T (y(t) - ySr)^2, \quad ySr = \frac{1}{T+1} \sum_{t=0}^T y(t)$$

$$Ky(\tau) = \frac{1}{T} \sum_{t=0}^{T-\tau} (y(t) - ySr) \cdot (y(t+\tau) - ySr)$$

где Ky – корреляционный момент;

T – интервал продолжительности выборки.

На рис. 4.37-4.39 показаны графики АКФ для первой, второй и третьей «тройки» опытов.

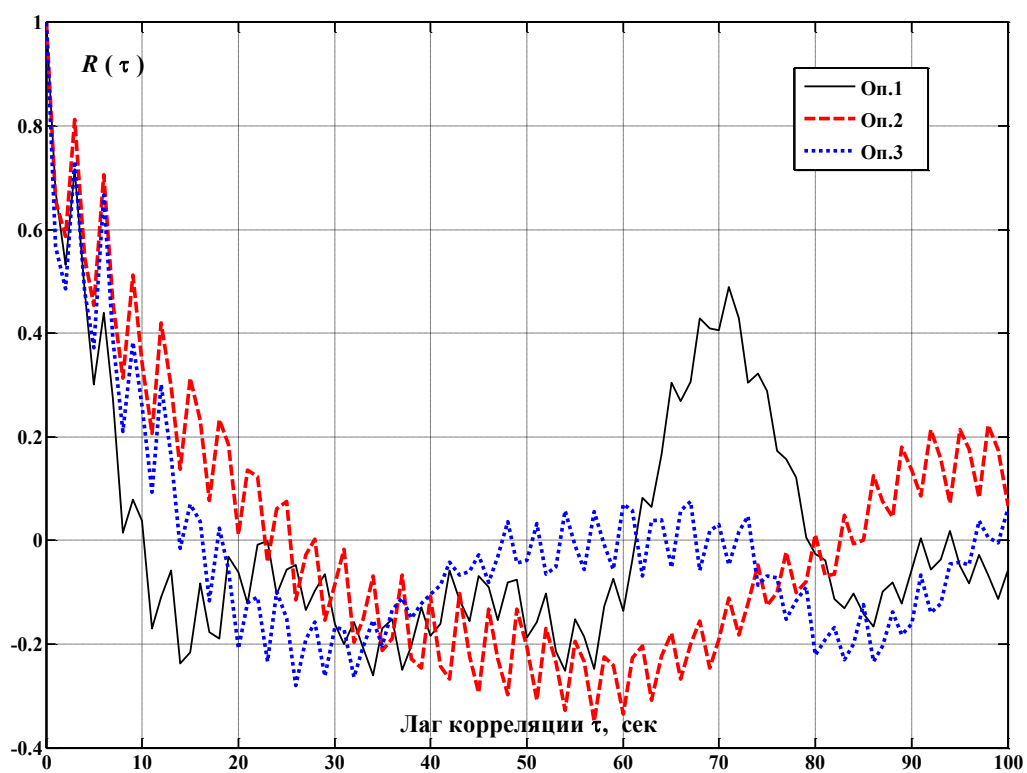


Рис. 4.37. Нормированная АКФ динамики накопления заряда, опыты 1, 2, 3

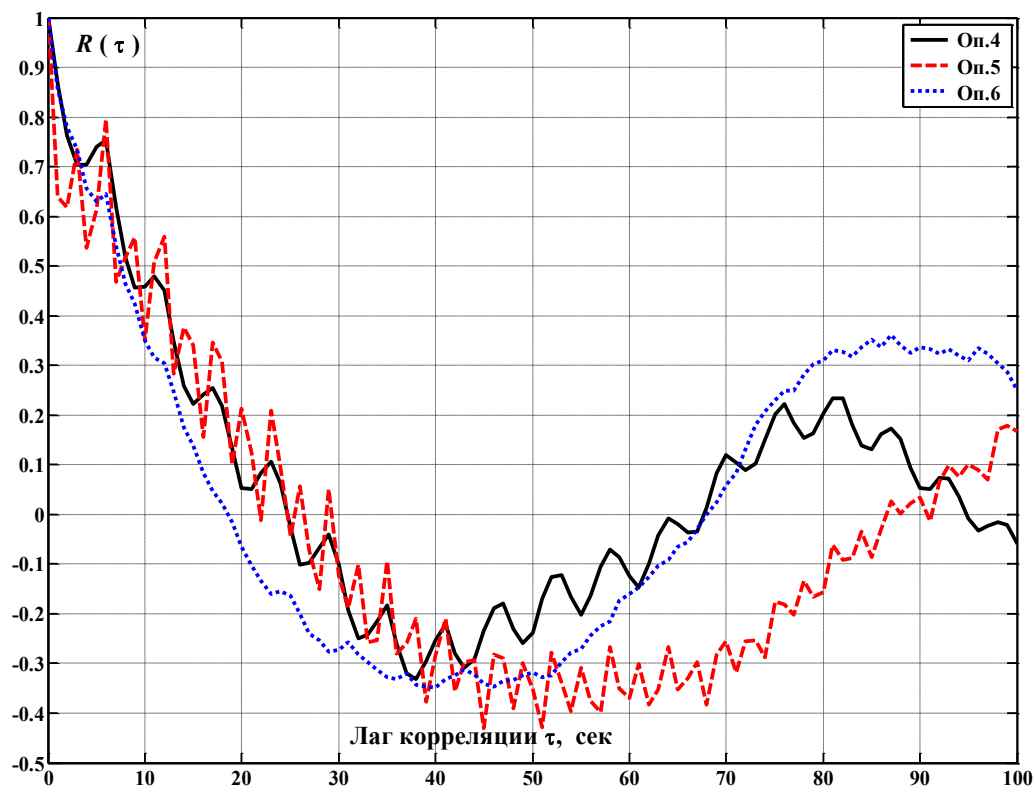


Рис. 4.38. Нормированная АКФ динамики накопления заряда, опыты 4, 5, 6

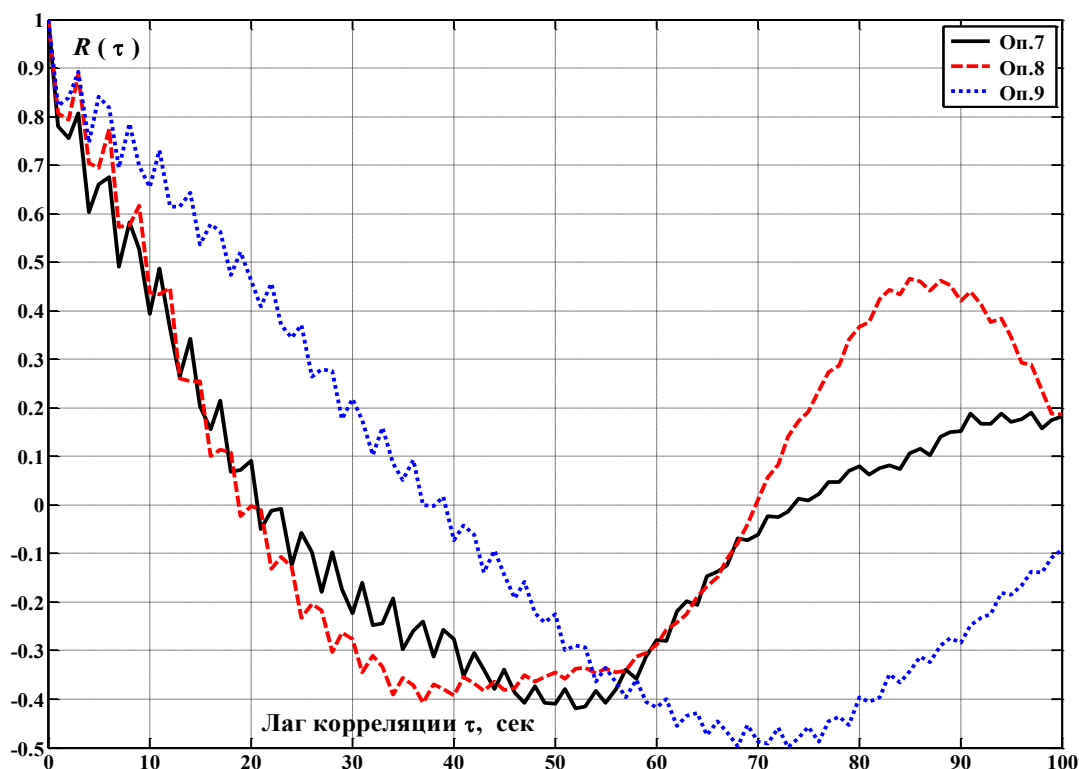


Рис. 4.39. Нормированная АКФ динамики накопления заряда, опыты 7, 8, 9

Из графиков следует, что в потоке данных в разные моменты времени имеется значимая корреляция между значениями. Коэффициент корреляции равен значению АКФ при соответствующем лаге τ . Интервал корреляции для всех опытов – не менее 20 сек.

Второй важный вывод – это присутствие в потоке измеренных данных, по меньшей мере, двух колебательных составляющих – «низкочастотной» с периодом $\sim 50 - 60$ сек, и «высокочастотной» - с периодом 4 – 6 сек.

Для подтверждения этого вывода проведен спектральный гармонический анализ с применением быстрого преобразования Фурье, позволивший получить оценки спектральной плотности дисперсии (СПД) потоков данных для каждого из опытов. Графики оценок СПД для опытов 1 и 2 приведены на рисунках 4.40 – 4.41.

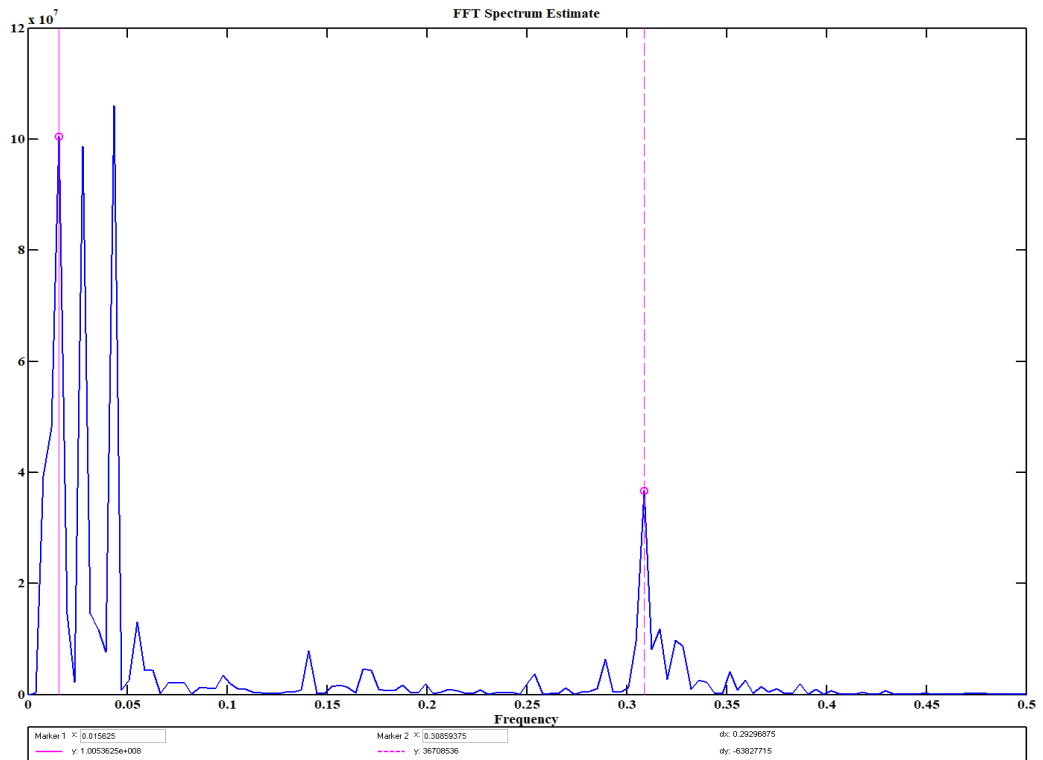


Рис. 4.40. СПД динамики накопления заряда, опыт 1

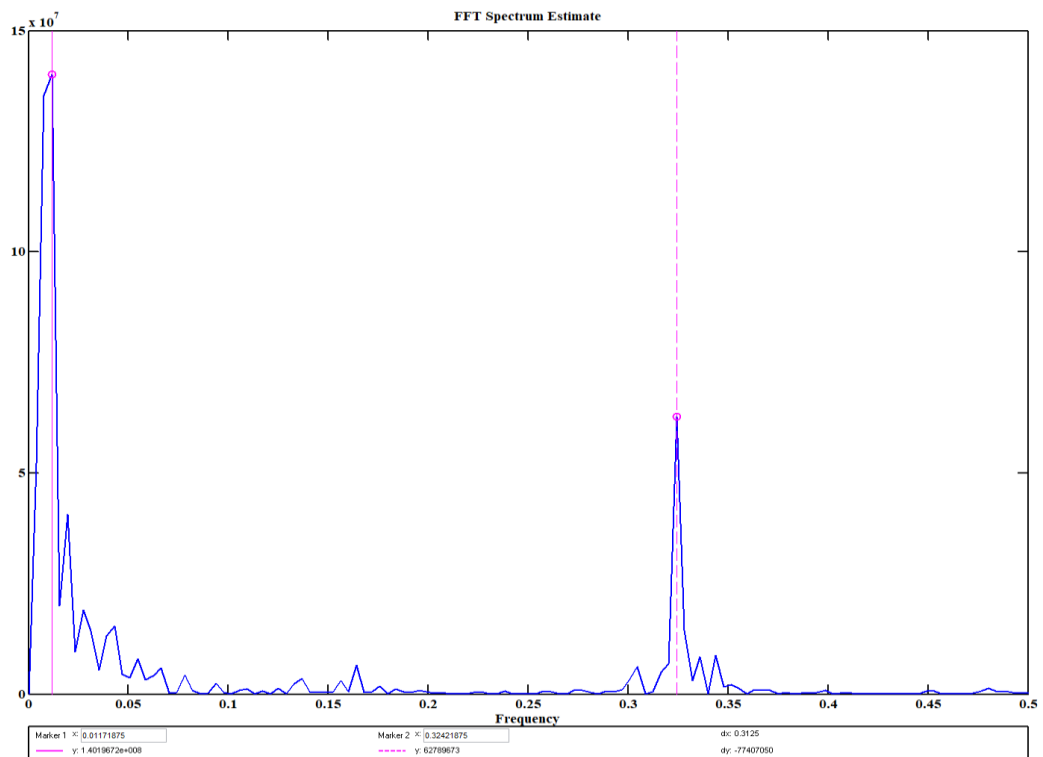


Рис. 4.41. СПД динамики накопления заряда, опыт 2

Практически на всех спектрах наблюдаются пики на низких частотах (в каждом опыте – своя частота и амплитуда, в некоторых опытах – несколько пиков), т.е. существует определённая закономерность или периодичность в потоках

данных. И пики на высоких частотах, которые характеризуют быстрые и случайные изменения в системе (в некоторых опытах – пики на высоких частотах не идентифицируются достаточно надежно).

Оценки СПД подтверждают вывод о присутствии в потоке измеренных значений потенциала, накопленного при ходьбе в обуви, периодических составляющих в двух диапазонах частот. Этот результат позволяет построить математическую модель динамики накопления заряда на поверхности человека при его движении по поверхности пола.

Таким образом, установлено, что, считая колебания электрического потенциала на теле испытуемого стационарным вероятностным процессом, корреляция между значениями присутствует, хотя интервал корреляции составляет несколько секунд. Практически во всех вариантах этого стационарного процесса четко выделяются низко- и высокочастотные периодические составляющие. Можно предположить, что они связаны с особенностями передвижения человека во время накопления заряда.

4.3.3. Математическая модель динамики накопления электростатических зарядов

Полученные закономерности позволяют нам построить математическую модель динамики накопления заряда на поверхности человека при его движении. Из общей теории накопления и истечения статических зарядов [4-6] в электростатическом поле известно, что этот процесс можно представить, как заряд и разряд конденсаторов, образуемых элементами одежды, обуви и тела человека. При этом кратковременное протекание заряда происходит с преодолением сопротивления среды, в которой наблюдается процесс. В соответствии с основными законами электрического поля и электростатики в условиях отсутствия реактивных сопротивлений (индуктивностей) изменение потенциала в процессах заряда – разряда описывается экспоненциальными функциями. Например, нарастание потенциала представляется функцией:

$$U(t) = U_0 + \sum_{k=1}^m U_k (1 - \exp(-a_k \cdot t)) \quad (4.4)$$

а уменьшение потенциала функцией вида:

$$V(t) = V_0 + \sum_{k=1}^m V_k \cdot \exp(-b_k \cdot t) \quad (4.5)$$

В этих выражениях $U(t)$, $V(t)$, U_0 и V_0 – текущие на момент времени t и предельные, при $t \rightarrow \infty$ значения напряжения накопления и стекания заряда, U_k и V_k – парциальные значения потенциалов, a_k и b_k – скорости накопления и стекания заряда. Количество слагаемых в суммах (4.4) и (4.5) выбирают исходя из желаемой точности описания процесса. Учитывая, что в потоке измеряемых значений значительна доля случайной составляющей, эти числа принимают равными единице или двум.

Накопление заряда происходит вследствие трения подошвы обуви о покрытие пола и складок одежды. Трение это является не постоянным во времени, поскольку связано с ходьбой испытателя. В этом, по-видимому, содержится причина периодических изменений в потенциале при накоплении заряда. Кроме того, на величине накопленного потенциала сказываются и нерегулярные, случайные источники заряда.

На основе изложенного описания примем, что «работа» источника регулярного накопления заряда характеризуется потоком прямоугольных импульсов, а «работа» источника случайных зарядов представляет собой белый шум, который является суммарным эффектом от действия многих факторов, и поэтому в силу центральной предельной теоремы его можно считать нормальным.

Функциям (4.4) и (4.5) для $m = 1$ или 2 соответствуют передаточные функции преобразования потока от имитатора источника зарядов в виде линейных апериодических динамических звеньев 1-го и 2-го порядков:

$$H(s) = \frac{1}{T_2 s^2 + T_1 s + 1} \quad (4.6)$$

у которых s – оператор Лапласа, а параметры T_1 и T_2 - результаты тождественных преобразований скоростей убывания экспонент a_1, a_2, b_1, b_2 .

Имитацию такого потока прямоугольных импульсов можно выполнить в пакете Matlab [122] с помощью скрипта:

```
% модель потока импульсов накопления заряда
clc; Tm=180; % моделируемый интервал времени
n1=50; n0=40; % число сэмплов на импульс и паузу
m=3; % число импульсов в интервале
T = Tm/m; % период следования импульсов
dt=T/(n1+n0); % квант времени сэмплирования
Fs=1/dt; % частота сэмплирования
S=[]; % контейнер для имитируемого периодического потока
s1=ones(n1,1); s0=zeros(n0,1); % массивы сэмплов импульса и паузы
% формирование периодического потока импульсов
for p=1:m; S=[S;s1;s0]; end
N=length(S); t=0:dt:(N-1)*dt; % число сэмплов и шкала времени
subplot(2,1,1); plot(z01223(1:Tm,1)/1250); grid on
stairs(t,S); % вывод графика потока импульсов
ylim([-0.1,1.1]); grid on
z=normrnd(0,1,N,1); % модель нормального белого шума
x=S+z; % модель потока импульсов с шумом
% subplot(3,1,2); plot(t,x); grid on
% Модель имитации динамики накопления потенциала
h=tf(1,[0.2 0.9 1])+tf(1,[2.5 5 1]); % ПФ преобразования
y=lsim(h,x,t); % преобразование в накапливаемый потенциал
subplot(2,1,2); plot(t,y); grid on
y0=y-mean(y); % центрирование потока накопления потенциала
[r,u]=xcov(y0,120,'coef'); % оценка нормированной АКФ
figure, plot(u,r) % график АКФ
```

В этом скрипте поток продолжительностью 180 сек состоит из трех прямоугольных импульсов по 50 сэмплов в каждом и интервалов между ними в 40 сэмплов. К детерминированному периодическому потоку прямоугольных импульсов добавлялась случайная составляющая в виде нормального белого шума с нулевым средним и среднеквадратическим отклонениями, равная единице. В качестве преобразователя потока от источника зарядов $x(t)$ в поток значений накопленного потенциала $y(t)$ использованы два включенных параллельно динамических элемента с передаточными функциями (ПФ) 2-го порядка. Преобразовательный элемент построен с помощью функции $tf()$. Затем преобразователем $lsim()$ осуществлялась конверсия ПФ потока $x(t)$ в поток потенциала $y(t)$.

Для иллюстрации работы модели на рис. 4.42 показаны центрированные значения накопленной напряженности ЭСП в опыте 3 (см. рис. 4.42, а) и модельные параметры, полученные с ее помощью (см. рис. 4.42, б).

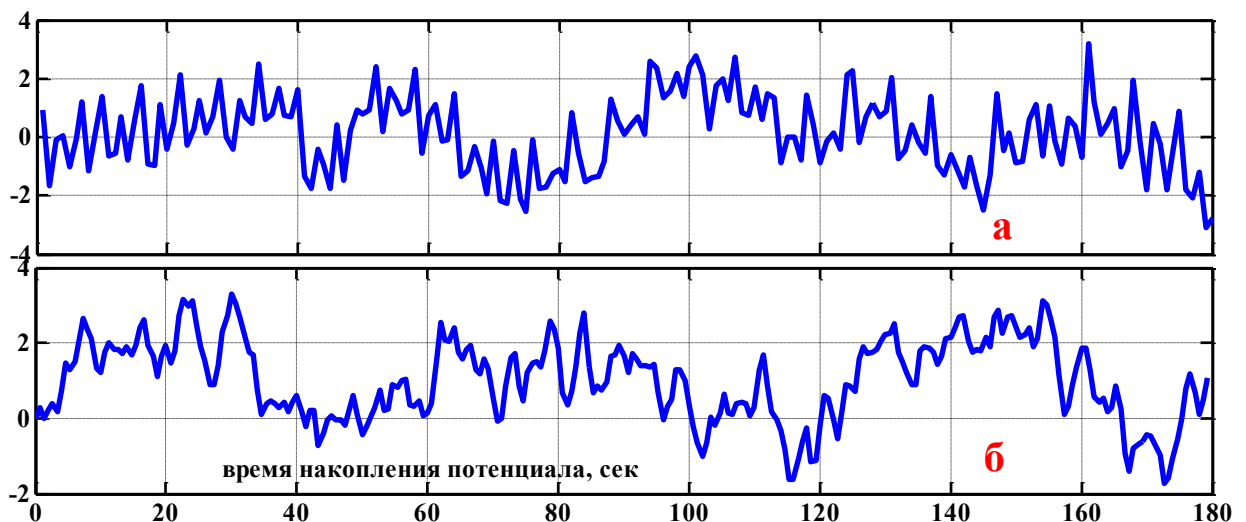


Рис. 4.42. Временные диаграммы накопления потенциала:
а – экспериментальное накопление заряда; б – модельный аналог

На рис. 4.43 показана оценка АКФ модели. Ее сравнение с графиками на рис. 4.37 показывают идентичность (в среднем) экспериментальных оценок АКФ и ее модельного варианта.

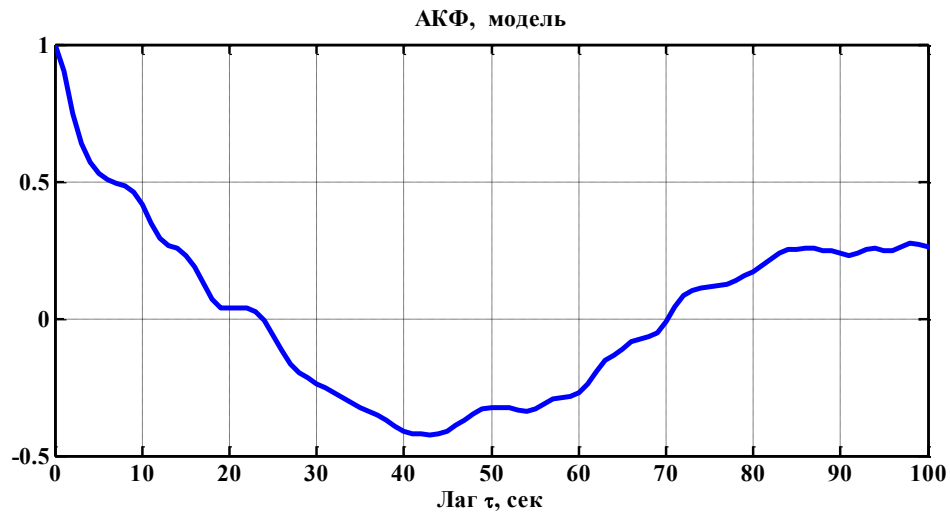


Рис. 4.43. График оценки АКФ для модельного потока накопленного потенциала

На рис. 4.44 показана оценка СПД для модельного потока $y(t)$ накопленного потенциала. Очевидно, что, как и в оценках СПД по результатам эксперимента (см. рис. 4.40 – 4.41), в этой оценке наблюдается явно выраженный пик в области низких частот. Вместе с тем высокочастотные колебания в модельной СПД отсутствуют, поскольку выбранные значения параметров ПФ не допускают высокочастотные составляющие в спектре дисперсии.

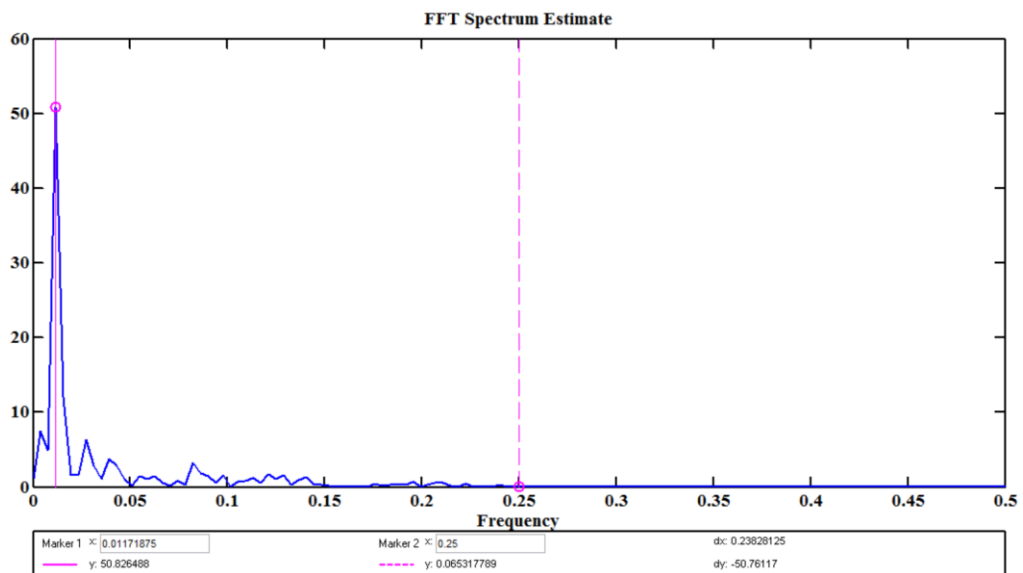


Рис. 4.44. Оценка СПД для модельных данных

Таким образом, математическая модель динамики накопления заряда статического электричества основывается на процессах зарядки/разрядки конденсаторов, формируемых элементами одежды и обуви. Для моделирования

накопления заряда использован поток прямоугольных импульсов, дополненный белым шумом, который отражает влияние случайных источников заряда. Передаточные функции преобразуют поток зарядов в значения накопленного потенциала через динамические звенья. Имитация в пакете Matlab подтверждает корректность модели, фиксируя схожесть экспериментальных и модельных значений накопленного потенциала, а также оценки АКФ. Наконец, спектральный анализ демонстрирует выраженные низкочастотные пики и отсутствие высокочастотных колебаний в модельном потоке данных, что соответствует физическим особенностям изучаемого процесса.

4.3.4. Статистический анализ динамики стекания электростатических зарядов

Перейдем к анализу результатов второго этапа эксперимента – показателей стекания заряда с неподвижного исследователя. Основной целью этого анализа является оценка скорости стекания заряда и ее зависимость от условий проведения эксперимента. Стеkanie заряда регистрировалось по величине электростатического потенциала.

Убывание потенциала происходит по экспоненциальному закону (4.5). Поэтому скорость стекания заряда можно оценить по коэффициентам регрессии экспериментальных данных. Для этой цели можно использовать два варианта обработки данных.

При первом варианте для построения регрессионной модели используем только ту часть потока данных, начальная граница которой определена нами как граница между этапами и до конца потока данных.

При втором варианте регрессионная модель строится по всему потоку данных и в модель включается часть, описывающая стекание заряда. В этом случае используем ранее разработанные регрессионную модель (4.1) и метод оптимального поиска коэффициентов регрессии. Поскольку результаты второго

варианта уже получены и приведены в табл. 3.13, то проведем анализ данных по первому варианту, построив нелинейную регрессию показателей стекания заряда.

$$Y_p(t) = a \cdot \exp(-b \cdot t) + c \cdot \exp(-d \cdot t) \quad (4.7)$$

или

$$Y_p(t) = a \cdot \exp(-b \cdot t) \quad (4.8)$$

В формуле 4.7 $Y_p(t)$ – прогнозируемое моделью значение потенциала в момент t , a , b , c и d – коэффициенты регрессионной модели, время t отсчитывается от момента начала стекания заряда.

Для построения регрессионной модели и оценки коэффициентов регрессии нами использована автоматизированная процедура `cftool` пакета Matlab. Ниже приведены протоколы работы этой процедуры для потоков данных каждого из 9 опытов эксперимента (рис. 4.45 – 4.53).

Опыт 1 (рис. 4.45). Model: $f(x) = a \cdot \exp(b \cdot x) + c \cdot \exp(d \cdot x)$

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$a = -3.248$ (-18.82, 12.33) $b = 0.01578$ (-0.001995, 0.03356)

$c = 1.464e+4$ ($1.401e+4$, $1.526e+4$) $d = -0.052$ (-0.0552, -0.049)

Goodness of fit: SSE: $1.011e+8$ R-square: 0.925

Adjusted R-square: 0.9242 RMSE: 584.5

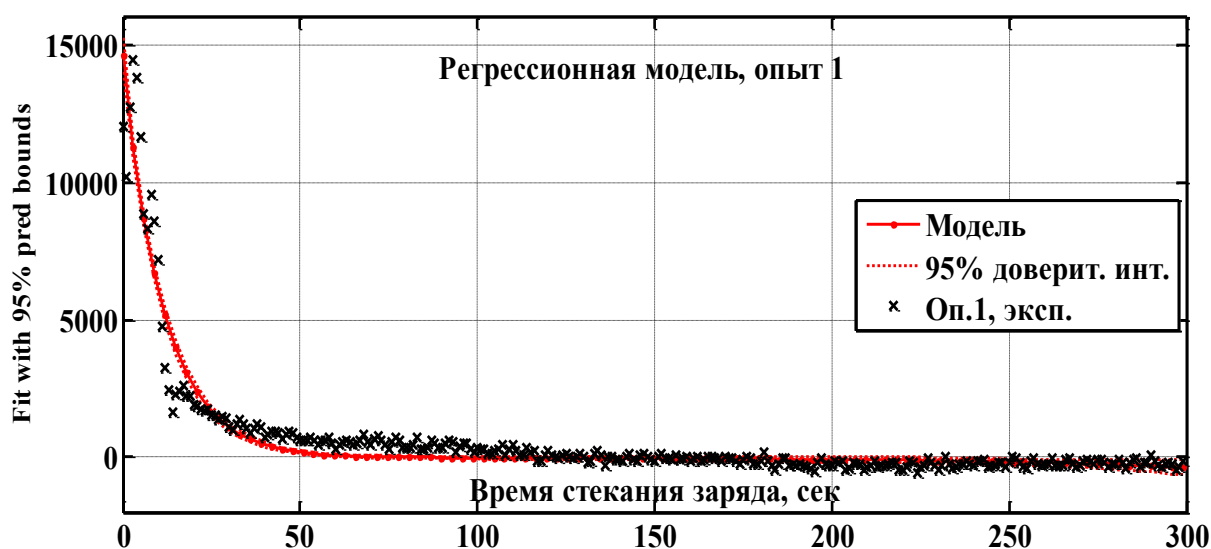


Рис. 4.45. Регрессионная модель и оценка коэффициентов регрессии, опыт 1

Опыт 2 (рис. 4.46). Model: $f(x) = a \cdot \exp(b \cdot x) + c \cdot \exp(d \cdot x)$

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$a = 2006$ (1487, 2525)

$b = -0.02344$ (-0.02892, -0.01797)

$c = 9942$ (9316, 1.057e+004)

$d = -0.1907$ (-0.2145, -0.1669)

Goodness of fit: SSE: 3.396e+007

R-square: 0.9433

Adjusted R-square: 0.9427

RMSE: 338.7

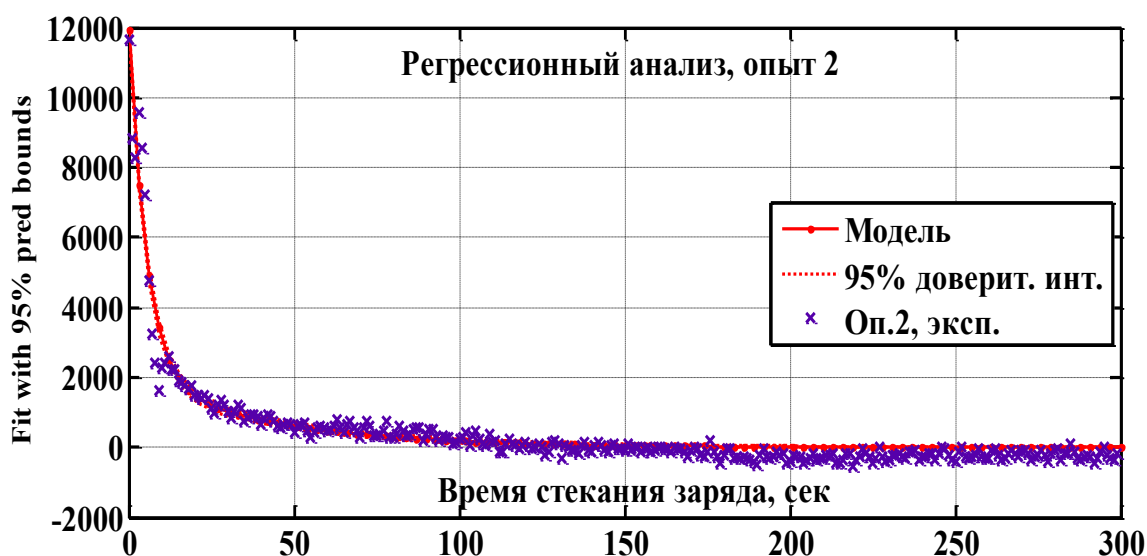


Рис. 4.46. Регрессионная модель и оценка коэффициентов регрессии, опыт 2

Опыт 3 (рис. 4.47). Model: $f(x) = a \cdot \exp(b \cdot x)$

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$a = 1.118e+4$ (1.079e+4, 1.157e+4)

$b = -0.164$ (-0.1727, -0.1553)

Goodness of fit: SSE: 1.593e+007

R-square: 0.9639

Adjusted R-square: 0.9637

RMSE: 283.6

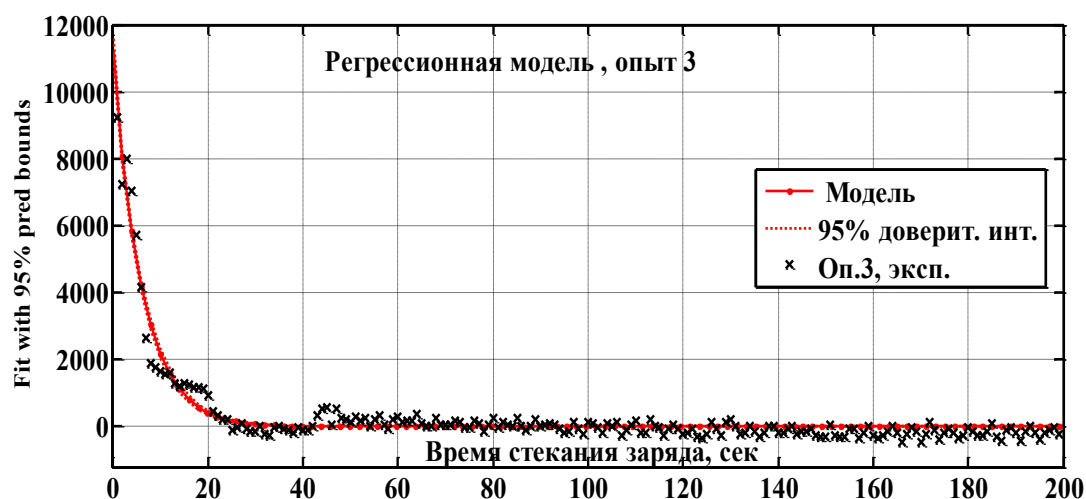


Рис. 4.47. Регрессионная модель и оценка коэффициентов регрессии, опыт 3

Опыт 4 (рис. 4.48). Model: $f(x) = a \cdot \exp(b \cdot x)$

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$a = 7725$ (7518, 7931) $b = -0.0188$ (-0.01952, -0.01809)

Goodness of fit: SSE: 6.062e+007 R-square: 0.9508

Adjusted R-square: 0.9507 RMSE: 390.3

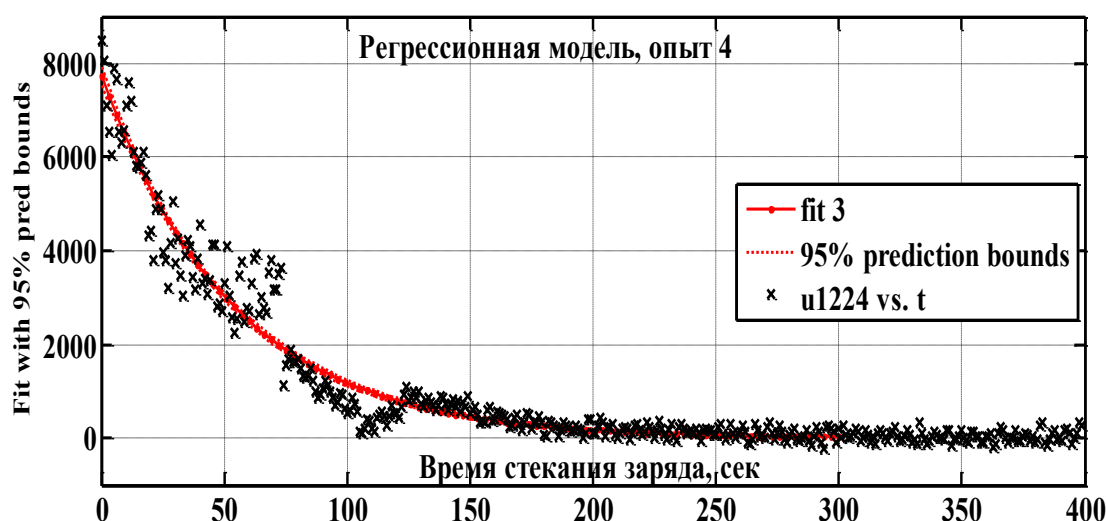


Рис. 4.48. Регрессионная модель и оценка коэффициентов регрессии, опыт 4

Опыт 5 (рис. 4.49). Model: $f(x) = a \cdot \exp(b \cdot x)$

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$a = 8019$ (7775, 8263) $b = -0.01539$ (-0.01605, -0.01472)

Goodness of fit: SSE: 1.027e+008 R-square: 0.9285

Adjusted R-square: 0.9283

RMSE: 508.1

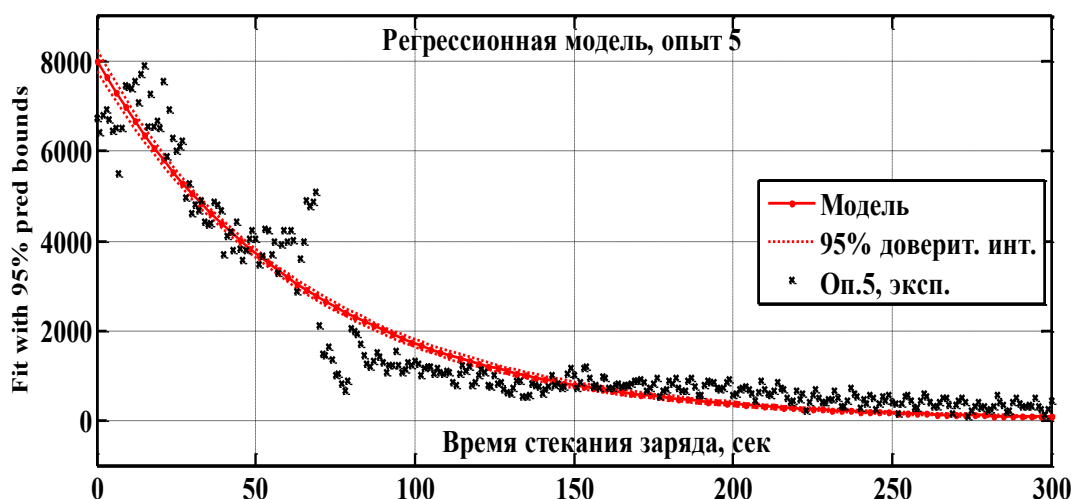


Рис. 4.49. Регрессионная модель и оценка коэффициентов регрессии, опыт 5

Опыт 6 (рис. 4.50). Model: $f(x) = a \cdot \exp(b \cdot x)$

Coefficients (with 95% confidence bounds):

 $a = 5825$ (5535, 6116) $b = -0.03577$ (-0.03834, -0.0332)

Goodness of fit: SSE: 6.518e+007 R-square: 0.8704

Adjusted R-square: 0.8701 RMSE: 404.7

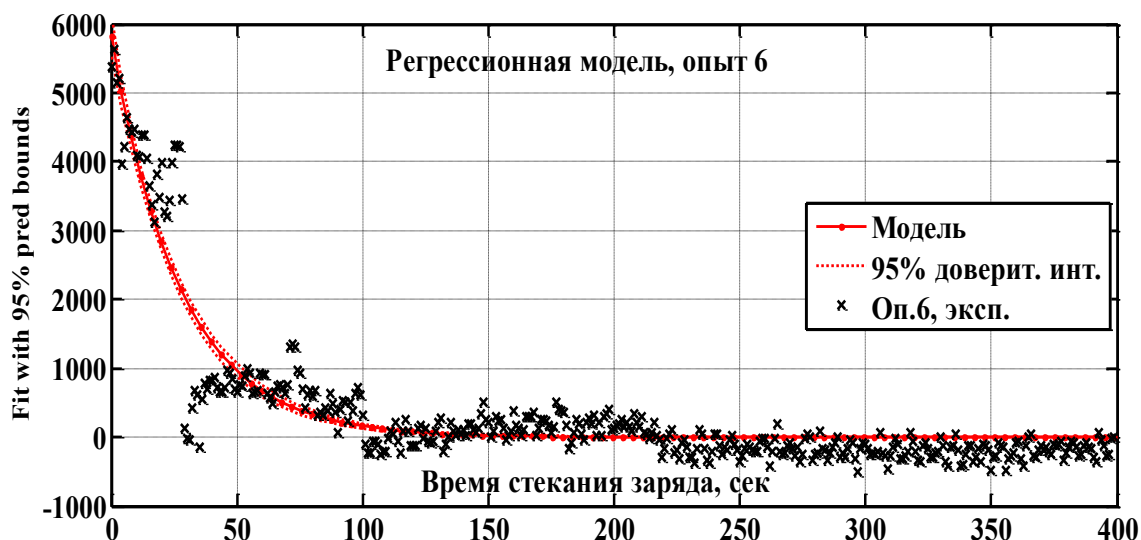


Рис. 4.50. Регрессионная модель и оценка коэффициентов регрессии, опыт 6

Опыт 7 (рис. 4.51). Model: $f(x) = a \cdot \exp(b \cdot x)$

Coefficients (with 95% confidence bounds):

 $a = 1.532e+4$ (1.462e+4, 1.602e+4) $b = -0.05586$ (-0.05958, -0.05215)

Goodness of fit: SSE: 1.886e+008

R-square: 0.912

Adjusted R-square: 0.9117

RMSE: 795.5



Рис. 4.51. Регрессионная модель и оценка коэффициентов регрессии, опыт 7

Опыт 8 (рис. 4.52). Model: $f(x) = a \cdot \exp(b \cdot x)$

Coefficients (with 95% confidence bounds):

 $a = 1.615e+4$ ($1.538e+4$, $1.693e+4$) $b = -0.03603$ (-0.03852 , -0.03354)

Goodness of fit: SSE: 4.607e+008

R-square: 0.875

Adjusted R-square: 0.8747

RMSE: 1076

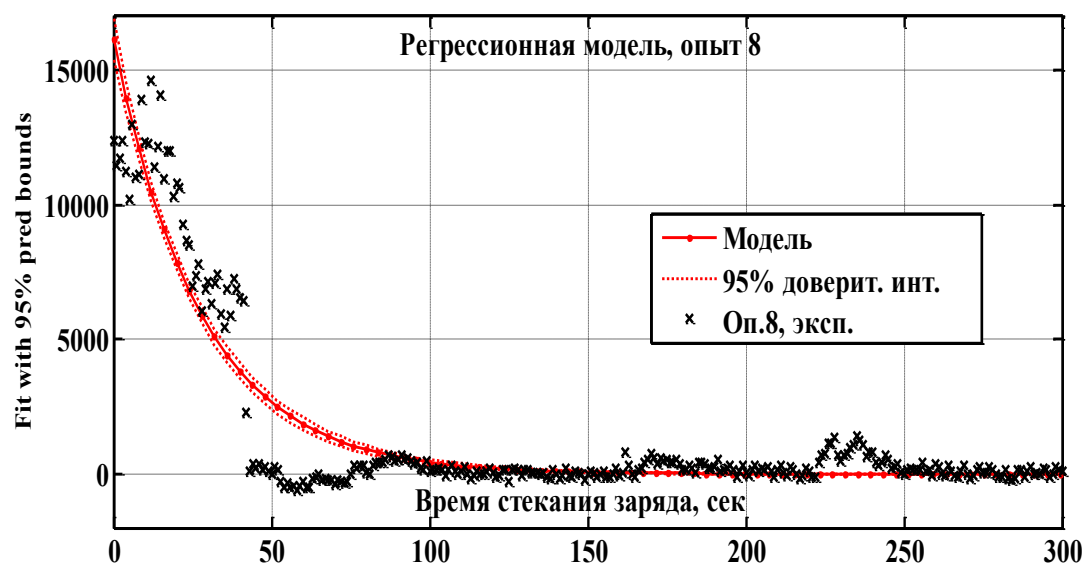


Рис. 4.52. Регрессионная модель и оценка коэффициентов регрессии, опыт 8

Опыт 9 (рис. 4.53). Model: $f(x) = a \cdot \exp(b \cdot x)$

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$a = 1.463e+4$ ($1.412e+4$, $1.515e+4$)

$b = -0.01884$ (-0.01978 , -0.01789)

Goodness of fit: SSE: $3.762e+008$

R-square: 0.9232

Adjusted R-square: 0.923

RMSE: 972.2

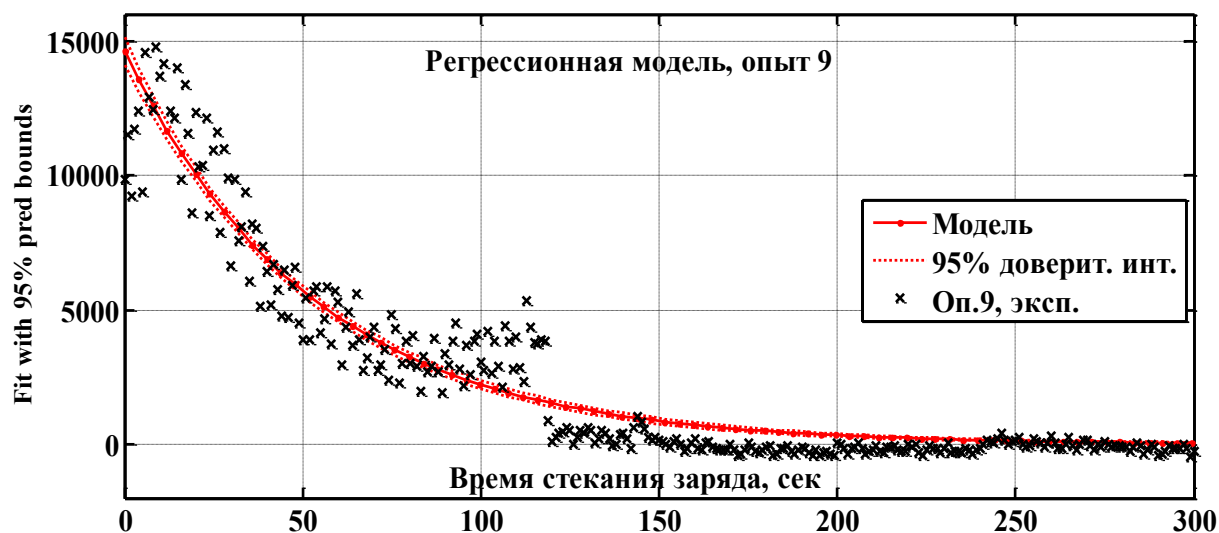


Рис. 4.53. Регрессионная модель и оценка коэффициентов регрессии, опыт 9

Сведем результаты статистической обработки опытов в табл. 4.14. Незначимые коэффициенты заменены нулевыми значениями. Коэффициент признается незначимым, если доверительный интервал для него включает точку 0, это подразумевает, что изменение независимой переменной не оказывает статистически значимого влияния на зависимую переменную.

Таким образом, каждый из 9 опытов продемонстрировал свою уникальную динамику, где регрессионные модели (как с двумя экспонентами, так и с одной) позволили получить различные оценки коэффициентов регрессии. Это подтверждается значениями коэффициента детерминации R^2 , которые варьируются от 0,8704 до 0,9639, показывая тем самым высокую степень корреляции между моделью и экспериментальными данными.

Табл. 4.14. Результаты статистической обработки данных 9 опытов

№ опыта	Точечные оценки коэффициентов регрессии				Q2
	a	b	c	d	
1	0	0	14640	-0.052	0,925
2	2006	-0.02344	9942	-0.1907	0,943
3	11180	-0.164	0	0	0,064
4	7725	-0.0188	0	0	0,951
5	8019	-0.01539	0	0	0,928
6	5825	-0.03577	0	0	0,870
7	15320	-0.05586	0	0	0.912
8	16150	-0.03603	0	0	0,875
9	14630	-0.01884	0	0	0,923

Кроме того, результаты по некоторым опытам указывают на незначимость коэффициентов, если их доверительные интервалы включают ноль, что отображает сложность механизма стекания заряда и необходимость дальнейших исследований для более точного анализа влиятельных факторов.

В целом, полученные результаты подтверждают правильность модели и позволяют говорить о высоком уровне связи между стеканием заряда и условиями эксперимента, что является фундаментальной основой для дальнейших исследований.

Анализ влияния варьируемого фактора на скорость стекания заряда.

Перейдем к материалу низа обуви, как фактора, влияющего на скорость стекания заряда, соответствие номера опыта типу обуви приведены в табл. 4.11. Скорость стекания заряда определяется величиной коэффициентов b и d регрессионных моделей, полученных выше. Данные сведены в таблицу 4.15.

Табл. 4.15. Коэффициентов b и d регрессионных моделей по 9 опытам

№ опыта	Тип обуви	b	d
1	Модель № 1		-0.052 (-0.055, -0.049)
2	Модель № 1	-0.0234 (-0.029, -0.018)	-0.1907 (-0.215, -0.166)
3	Модель № 1	-0.164 (-0.173, -0.155)	
4	Модель № 2	-0.0188 (-0.019, -0.018)	
5	Модель № 2	-0.0154 (-0.0160, -0.0147)	
6	Модель № 2	-0.0356 (-0.0383, -0.0332)	
7	Модель № 3	-0.0559 (-0.0596, -0.0521)	
8	Модель № 3	-0.0360 (-0.0385, -0.0335)	
9	Модель № 3	-0.0188 (-0.0197, -0.0179)	

Указанные доверительные интервалы (например, (-0.055, -0.049)) показывают диапазон, в котором с заданной вероятностью (обычно 95%) находится истинное значение коэффициента. Все доверительные интервалы не пересекают ноль, что указывает на статистическую значимость коэффициентов. Знак минус в оценках параметра регрессии – коэффициента в показателе экспоненты – говорит об убывании потенциала по мере стекания заряда.

Из табл. 4.15 следует, что Модель 1 демонстрирует более значимые коэффициенты, чем Модель № 2, тогда как Модель № 3 показывает умеренные значения. Для наглядного отображения результатов построен график зависимости скорости стекания заряда от номера опыта (рис. 4.54).

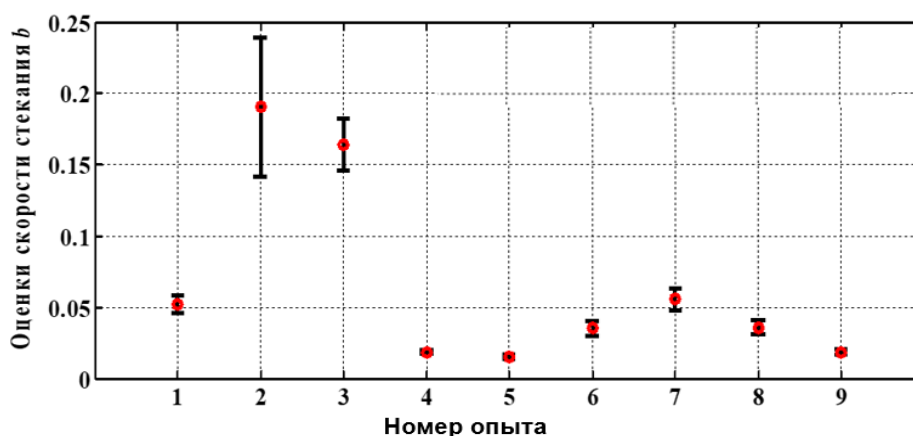


Рис. 4.54. График зависимости скорости стекания заряда от номера опыта

Из рис. 4.54 видно, что доверительные интервалы, полученные для коэффициентов регрессии – скорости стекания заряда малы для того, чтобы установить значимость их влияния. Как следует из графика, наименьшая скорость стекания заряда (№ опыта 2 и 3) соответствует Модели 1, то есть повседневной обуви, а наибольшая скорость стекания заряда (№ опыта 4-9) - Моделям 2 и 3 – антистатической обуви.

4.3.5. Методика обработки результатов эксперимента динамики накопления и стекания заряда

Представленные в табл. 4.12 соответствия номера опыта типу обуви и на рис. 4.31 диаграммы динамики накопления и стекания заряда на теле исследователя состоят из трех повторных замеров на трех идентичных образцах обуви (1, 2 и 3 опыты, 4, 5 и 6 опыты и 7, 8 и 9 опыты). Наличие повторных опытов позволяет получить оценки, модели и делать выводы по усредненным данным. Заметим, что специфика измерения накопления/стекания заряда такова, что равные интервалы времени между измерениями не могут быть гарантированы. Объем данных в каждом потоке также различается, поэтому для обработки данных возможны два подхода.

При первом подходе результаты каждого из повторных опытов обрабатываются отдельно, как это и было сделано и описано в предыдущих разделах (4.3.1-4.3.4). Затем для повторных опытов найденные оценки усредняются.

Другой подход заключается в усреднении исходных потоков данных для повторных опытов и получении оценок по усредненным значениям.

Каждый из повторных потоков данных имеет разный объем: 1318, 1054, 1053, 1316. Для упрощения дальнейшей обработки данных в потоках нами приняты первые 1000 значений. Обозначим матрицы с тремя повторными потоками значений как $Y_{13}(j,k)$, $Y_{46}(j,k)$, $Y_{79}(j,k)$? $j = 1, \dots, 1000$; $k = 1, 2, 3$.

Для каждой из этих матриц найдем усредненные значения как средние арифметические, оценки медианы и среднеквадратических отклонений (СКО) по формулам:

$$Y_{sr}(j) = \frac{Y(j, 1) + Y(j, 2) + Y(j, 3)}{3}, \quad (4.9)$$

$$Y_{me}(j) = Y(j, k), \text{ если } Y(j, k) < \max\{Y(j, k) | k = 1, 2, 3\} \text{ и } Y(j, k) > \min\{Y(j, k) | k = 1, 2, 3\} \quad (4.10)$$

$$SY(j) = \sqrt{\frac{1}{2} \cdot \sum_{k=1}^3 (Y(j, k) - Y_{sr}(j))^2} \quad (4.11)$$

На рис. 4.55 (а, б, в) показана динамика изменения средних, медиан и СКО для трех рассмотренных повторных серий измерений. Из рисунка следует, что динамика изменения среднего арифметического и медианы в трех повторных измерениях практически одинакова. Поэтому в последующем будем их использовать, как несмещенную оценку математического ожидания.

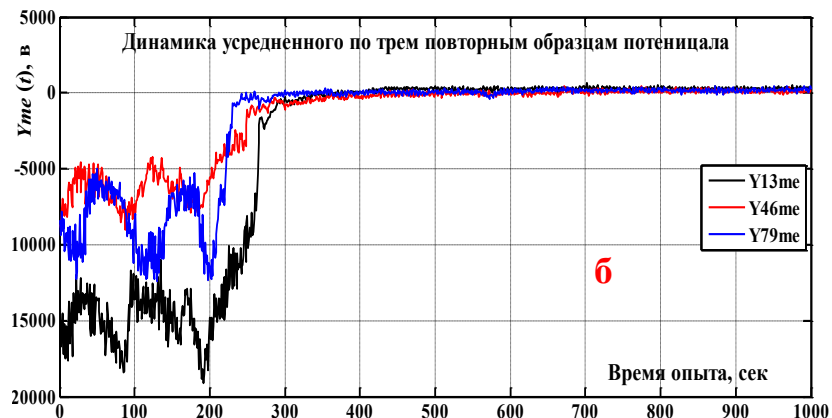
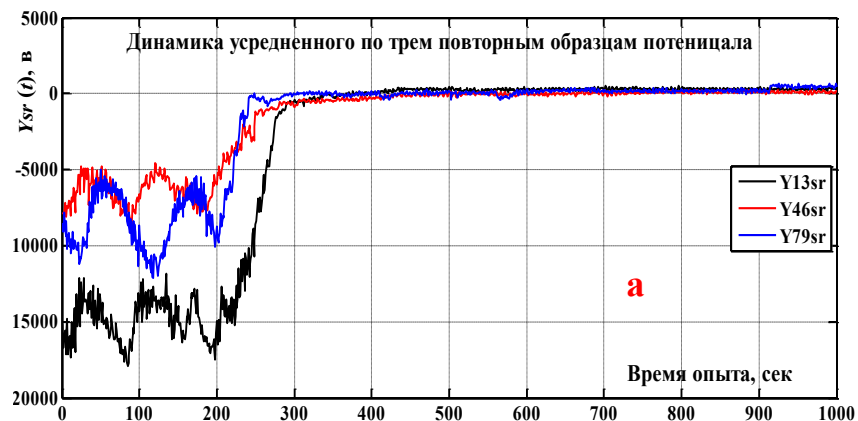




Рис. 4.55. Динамика изменения средних (а), медиан (б) и СКО (в) для трех рассмотренных повторных серий измерений

Оценка СКО по повторным измерениям показывает ее высокую вариабельность во времени, особенно на этапе накопления заряда. Заметим, однако, что анализ выполнен всего по трем значениям повторных измерений, поэтому его надежность не велика. Высокая вариабельность СКО и на втором этапе опыта, во время стекания заряда, говорит также о ненадежности этой характеристики. Для уточнения оценки СКО необходимо большее количество повторных измерений.

Построим регрессионную модель для трех кривых $Y_{sr}(t)$, (см. рис. 4.55, а) согласно выражению (4.1) пакете Matlab [122].

% Выбор оптимальной нелинейной регрессии p24

clc; tic; % запуск таймера

Te=1000; % длина реализации

% стартовые значения коэффициентов регрессии

as(1,1)=180; as(2,1)=15000; as(3,1)=0.01;

t=0:Te-1; % переменная времени

% обрабатываемый поток усредненных данных и его график

ye=-E4_6sr(1,1:Te); plot(t, ye, 'k')

Np=1000; % число пробных точек случайного поиска

Npp=6; % число циклов адаптации случайного поиска

CVa=0.1; % коэффициент вариации рассеяния точек поиска

Wopt=10^9; % стартовое значение критерия качества регрессии

```

aopt=as; % сначала - стартовые значения как оптимальные
yp=myf(aopt,Te); % текущие наилучшие модельные данные
for pp=1:Npp % начало циклов адаптации
for p=1:Np% начало проб случайного поиска
    W=(ye-yp)*(ye-yp)'/Te; % расчет текущего значения критерия
    if W<Wopt % если пробное значение лучше текущего наилучшего
        aopt=a; Wopt=W; % оно становится текущим наилучшим
    end
    % генерация пробных случайных значений коэффициентов регрессии
    a=abs(normrnd(as,CVa*as));
    a(1,1)=round(a(1,1)); % параметр a должен быть целым
    % в качестве значения параметра b - среднее ye от 0 до a
    a(2,1)=mean(ye(1,1:a(1,1)));
    a(3,1)=a(2,1); % параметры b и c равны
    % расчет потока модельных данных для пробного варианта регрессии
    yp=myf(a,Te);
end % окончание циклов проб случайного поиска
as=aopt; % адаптация области поиска
end % окончание циклов адаптации
yp=myf(aopt,Te); % расчет прогноза оптимальной регрессионной модели
hold on; plot(t,yp,'k'); xlim([0,500]); hold on; % график оптимальной регрессии
aopt % оптимальные коэффициенты регрессии
Q2=1-Wopt/var(ye) % квадрат коэффициента детерминации модели
Tmod=toc % затраты машинного времени на решение
% расчет модельных значений потока данных
% для пробного варианта коэффициентов регрессии
function y=myf1(a,Te);
t=0:Te-1; % переменная времени
for j=1:Te
    % если время меньше конца накопления заряда

```

```

if t(1,j)<a(1,1)
% модельные значения равны текущему среднему уровню
y(1,j)=a(2,1);
else % иначе расчет экспоненциального стекания по модели
y(1,j)=a(3,1)*exp(-a(5,1)*(t(1,j)-a(1,1)));
end
end
end

```

Таким образом получены усредненные данные и регрессионные модели по экспериментам при 3-х уровнях факторов (рис. 4.56).

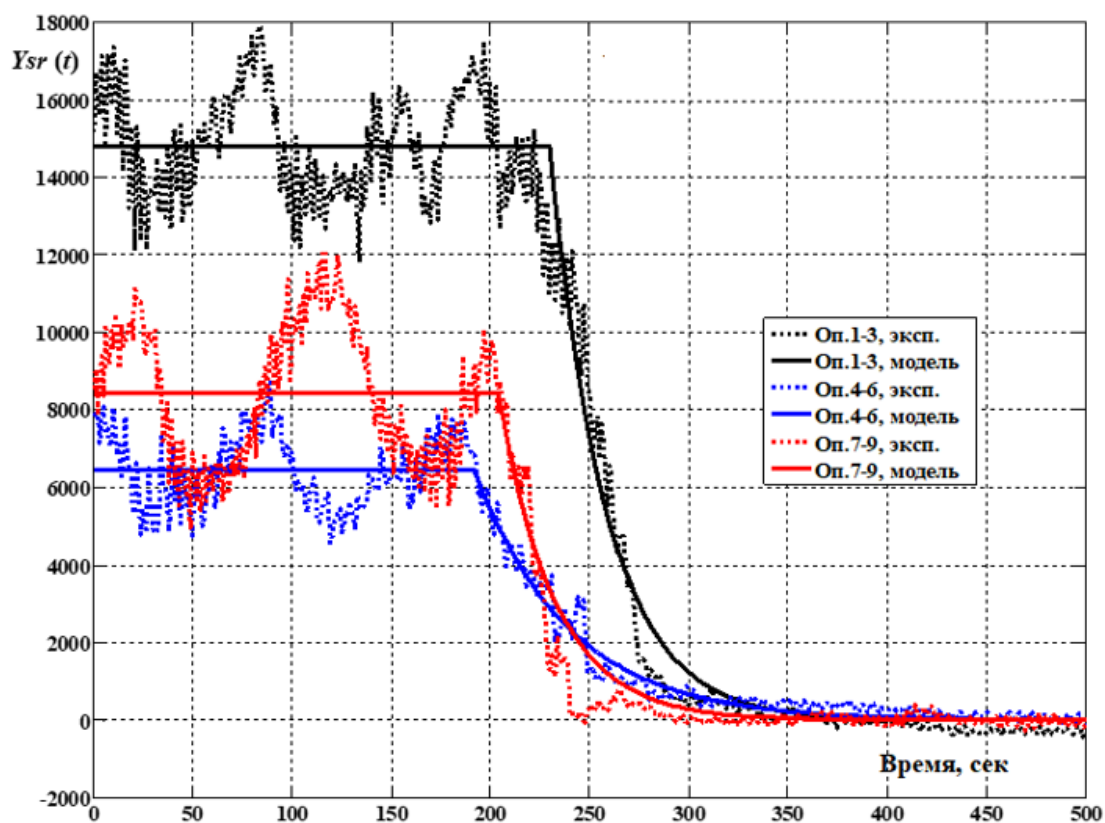


Рис. 4.56. Усредненные данные по экспериментам при 3-х уровнях факторов и их регрессионные модели

В табл. 4.16 представлены коэффициенты a , b , c , а также коэффициент достоверности Q_2 .

Табл. 4.16. Коэффициенты а, b, с, коэффициент достоверности Q2 по 9 опытам

№ опыта	Коэффициенты			
	a	b	c	Q2
1-3	229	14840	0.0351	0.986
4-6	192	6449	0.0208	0.971
7-9	204	8447	0.0353	0.941

Таким образом, проведена систематическая обработка результатов измерений потенциала на исследователе, полученных в рамках трех повторных серий, что позволило получить усредненные данные и выявить общие тенденции в поведении системы, а также четкую разницу между моделями обуви. Отличительной чертой анализа является различное количество данных в каждом потоке, что подчеркивает необходимость обработки измерений с учетом этих различий. Однако, даже при положительном результате обработки с ограничением числа измерений до первых 1000 значений следует иметь понимание о возможном влиянии на полное представление о динамике процесса принятых деприваций.

Методы, использованные для расчета средних значений, медиан и среднеквадратических отклонений, показали, схожесть динамики средних арифметических значений и медиан, что подтверждает надежность применяемого подхода. Несмотря на высокую вариабельность среднеквадратического отклонения, особенно на этапе накопления заряда, важно учесть, что малое количество повторных измерений снижает надежность этих оценок.

4.3.6. Моделирование накопления и стекания электростатического заряда в системе «обувь – человек - окружающая среда»

На основе проведенного моделирования двух этапов нами разработана математическая модель «накопления-стекания» электростатических зарядов системы «обувь – человек - окружающая среда», которая позволяет отобразить

зависимость потенциала и тока от времени в условиях трибоэлектрического эффекта.

На первом этапе испытатель в обуви равномерно ходит по полу с определенным покрытием в течение фиксированного отрезка времени. На втором этапе он неподвижен. На испытателе закреплен измеритель потенциала, который в течение всего эксперимента накапливает результаты измерения через фиксированные интервалы времени. На первом этапе за счет трения обуви о покрытие пола возникает эффект трибоэлектричества – разделение зарядов и накопление их на испытателе, вследствие этого потенциал повышается. Одновременно на первом и втором этапах происходит стекание заряда до выравнивания с потенциалом пола.

Изменение потенциала можно описать следующими известными уравнениями

$$\frac{d(C U)}{dt} = J - I, \quad U = R I \quad (4.12)$$

где

C – электрическая емкость испытателя с одеждой и обувью, U – измеряемый потенциал, J – ток зарядов, поступающих в результате трибоэлектрического эффекта, R – электрическое сопротивление испытателя с одеждой и обувью, I – ток зарядов, стекающих с испытателя на покрытие пола. Все перечисленные величины являются функциями времени.

Объединение этих уравнений в одно относительно потенциала приводит к выражению

$$R \frac{d(CU)}{dt} + U = JR \quad (4.13)$$

или с учетом изменения величин во времени

$$R(t) C(t) \frac{dU(t)}{dt} + R(t) U(t) \frac{dC(t)}{dt} + U(t) = J(t) R(t) \quad (4.14)$$

В простейшем случае, когда параметры системы емкость и сопротивление постоянны, приходим к линейному дифференциальному уравнению относительно потенциала

$$RC \frac{dU(t)}{dt} + U(t) = R J(t) \quad (4.15)$$

В первом приближении можно считать, что ток заряда $J(t)$ постоянен – $J(t) = J_0$ – в течение первого этапа эксперимента продолжительностью T_1 , а затем равен нулю. Естественное начальное условие для уравнения (4.15) – $U(0) = 0$ – означает, что в начале эксперимента разность потенциалов испытателя и пола равна нулю. Решением уравнения (3.15) при этих условиях будет:

$$\begin{aligned} U(t) &= R J_0 (1 - \exp(-t/T)), & 0 < t \leq T_1, \\ U(t) &= U(T_1) \exp(-(t - T_1)/T), & T_1 \leq t < \infty \end{aligned} \quad (4.16)$$

В этих формулах $T = RC$ – постоянная времени системы «испытатель + обувь + окружающая среда». Для наглядности отобразим решение (4.16) на графиках (рис. 4.57).

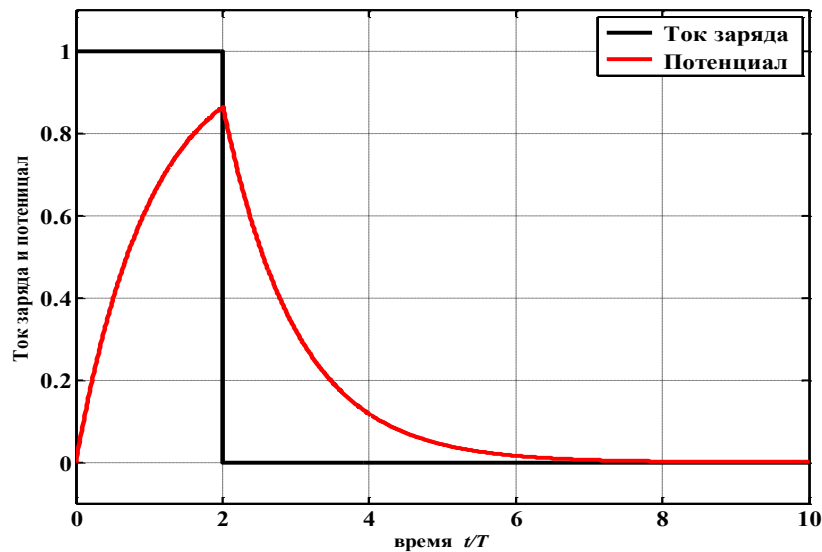


Рис. 4.57. Зависимость потенциала и тока от времени в условиях трибоэлектрического эффекта

Ниже приведен скрипт построения графиков:

```
clear, clc; T=1; T1=2; Tm=10;
RJ0=1; t1=0:0.01:T1; t2=0:0.01:Tm-T1;
U1=RJ0*(1-exp(-t1/T)); U2=U1(end)*exp(-t2/T);
U=[U1,U2(1:end-1)]; t=0:0.01:Tm;
J0=[ones(1,length(t1)-1),zeros(1,length(t2))];
stairs(t,J0,'k'); hold on; plot(t,U); ylim([-0.1,1.1])
```

На рис. 4.58 представлен экспериментальный график изменения потенциала.

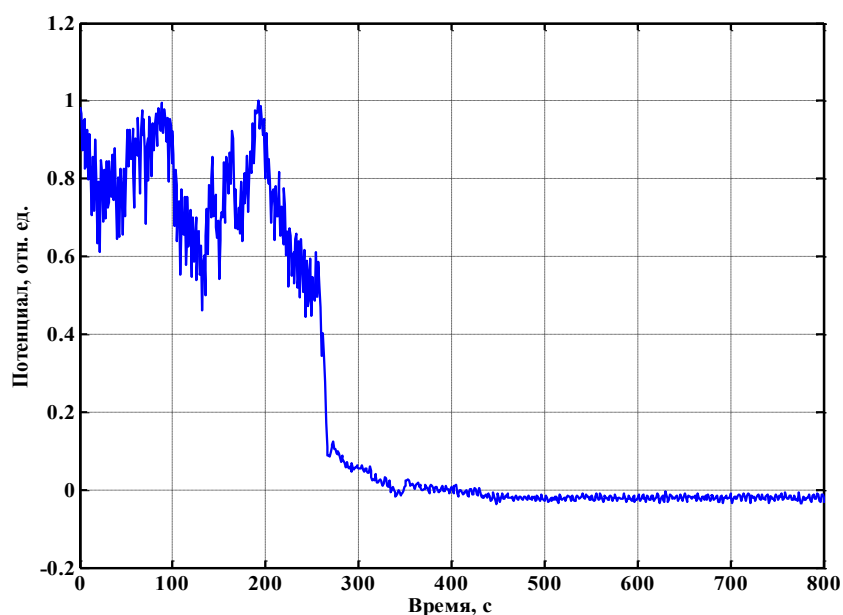


Рис. 4.58. Экспериментальное изменение потенциала: вариативность в процессе накопления заряда

Сравнение графиков показывает, что процесс накопления заряда происходит с большими случайными вариациями и сопряжен с действием большого количества случайных факторов при малых постоянных времени T .

Простейший способ ввести в модель наблюдаемые в эксперименте случайные вариации – трансформировать ток заряда в процесс, содержащий случайную составляющую. Скорректированная таким образом модель реализована в скрипте:

```
clear, clc;
```

```
T=0.1; T1=2; Tm=10;
```

```
t1=0:0.01:T1; t2=0:0.01:Tm-T1; t=0:0.01:Tm;
```

```
mRJ0=1; s=0.5;
```

```
RJ1=abs(normrnd(mRJ0,s,1,length(t1))).*ones(1,length(t1));
```

```
RJ2=normrnd(zeros(1,length(t2)-1),s/10); RJ0=[RJ1,RJ2];
```

```
h=tf(mRJ0,[T 1]), [U,t]=lsim(h,RJ0,t); plot(t,RJ0,t,U)
```

На рис. 4.59 показаны случайные вариации тока заряда, сгенерированные скриптом математической модели, и динамика изменения потенциала на первом и

втором этапах эксперимента. На визуальном уровне данная модифицированная модель может считаться адекватной наблюдаемым в эксперименте значениям.

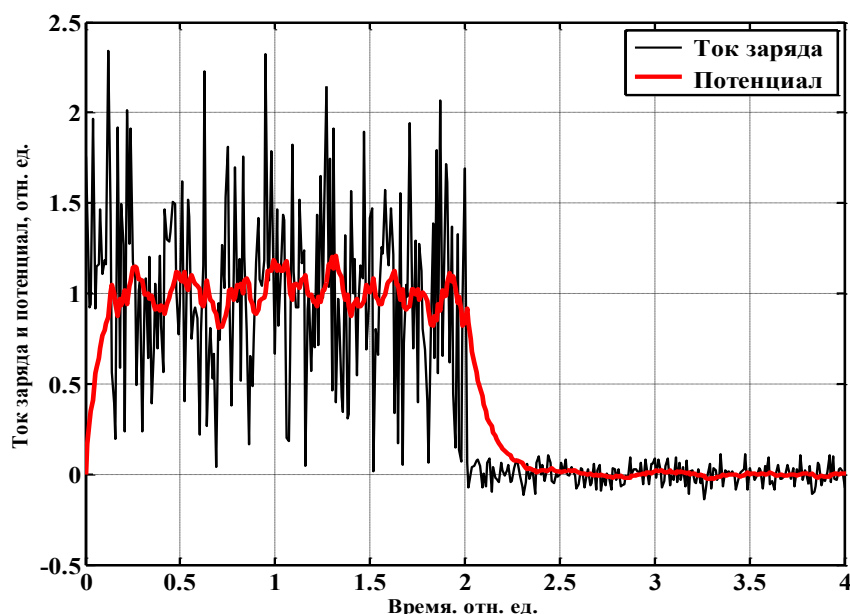


Рис. 4.59. Модель динамики изменения потенциала и случайные колебания тока заряда

Как показывают экспериментальные данные, при испытании некоторых образцов наблюдалась настолько высокая скорость стекания, что экспоненциальная зависимость от времени превращалась в практически вертикальное ступенчатое изменение потенциала. Модель позволяет получить этот эффект, значительно уменьшив параметр T - время переходного режима. Например, при прочих равных условиях, примем $T = 0,02$, т.е. уменьшим параметр в 5 раз, тогда графики на рис. 4.59 приводятся к виду, показанному на рис. 4.60.

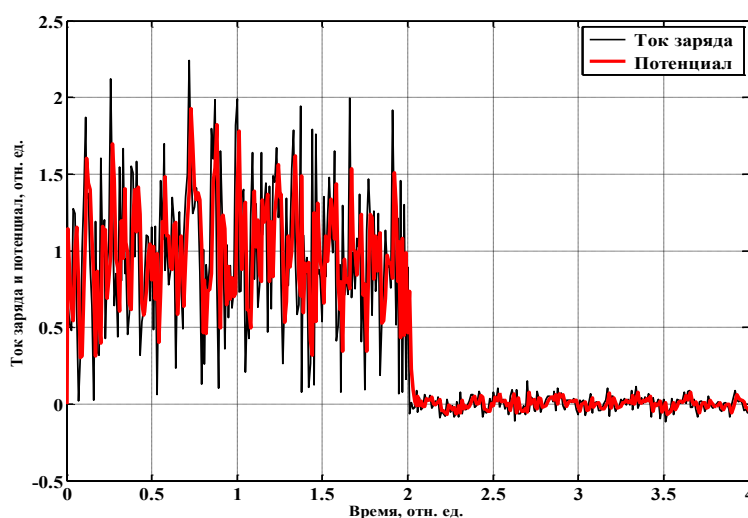


Рис. 4.60. Модель изменения потенциала при высокой скорости стекания и уменьшении времени переходного режима

В других экспериментах наряду со случайными вариациями потенциала на первом этапе наблюдались его периодические вариации, что свидетельствовало об их наличии в токе заряда. Этот эффект также может быть получен на модели, если на первом этапе добавить поток значений тока заряда J_0 периодическую составляющую. Ниже приведен соответствующим образом модифицированный скрипт:

```
clear, clc;
T=0.01; T1=2; Tm=10; t1=0:0.01:T1; t2=0:0.01:Tm-T1; t=0:0.01:Tm;
mRJ0=1; s=0.5; A=0.5; Tp=T1/4;
RJ1r = abs( normrnd( mRJ0, s, 1, length(t1))) .* ones( 1, length(t1));
RJ1p = A*sin(2*pi*t1/Tp); RJ1 = RJ1r + RJ1p;
RJ2 = normrnd( zeros( 1, length(t2) - 1), s/10);
RJ0=[RJ1,RJ2]; h=tf(mRJ0,[T 1]), [U,t] = lsim(h,RJ0,t); plot(t, RJ0, t, U)
```

На рис. 4.61 показаны графики, аналогичные рис. 4.59 и рис. 4.60, но с добавлением периодической составляющей на этапе накопления заряда. Сравнение графика изменения потенциала с графиками, полученными в эксперименте, показывает, что разработанная модель вполне пригодна для моделирования натурального эксперимента с образцами испытываемой обуви.

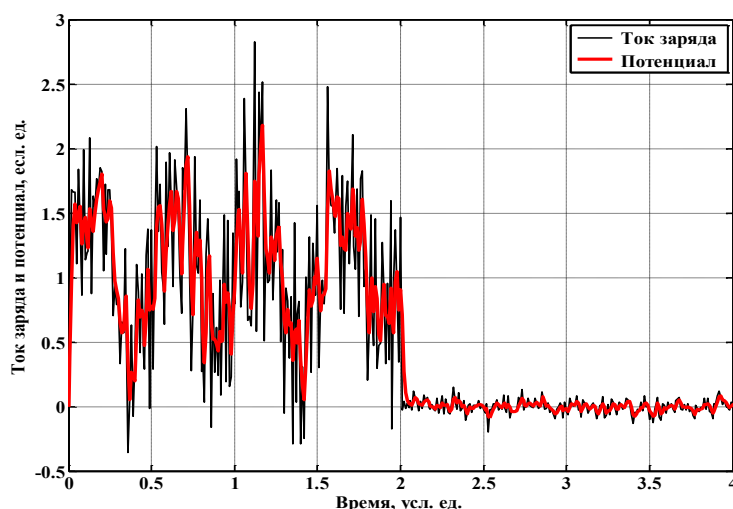


Рис. 4.61. Модель изменения потенциала при периодических составляющих в токе заряда

Таким образом, разработанная математическая модель является валидной и качественно иллюстрирует основные физические процессы, сопровождающие

взаимодействия человека в обуви с окружающей средой. Разработанная модель предоставляет мощный инструмент для изучения процессов накопления и стекания заряда в условиях, близких к реальным и позволяет не только минимизировать количество необходимых для исследования натурных опытов, но и глубже понять физику процессов трибоэлектричества и токов утечки. Завершая представление эксперимента и его моделирования, можно утверждать, что разработанная математическая модель является достаточно валидной и качественно иллюстрирует основные физические процессы, сопровождающие взаимодействия человека с различными покрытиями полов. Это имеет значение, как для практического применения в разработке конструкций антистатической обуви, так и повышения безопасности на производстве.

4.4. Визуализация экспериментальных исследований системы «обувь - человек - окружающая среда»

Графическая интерпретация данных позволяет наглядно увидеть тенденции, закономерности и аномалии в данных, которые могут быть сложными для восприятия при просмотре чисел или таблиц [198, 199, 350]. Визуальный анализ данных может быть полезен на этапе принятия решений. Проведем визуальный анализ каждой серии ранее проведенных 7 серий эксперимента.

1. Первая серия эксперимента

Условия: 9 потоков данных, на 3 модели обуви (Модель № 1, Модель № 2, Модель № 3) по 3 повторяющихся опыта. На рис. 4.62 показаны графики изменения напряженности ЭСП в течение опыта.

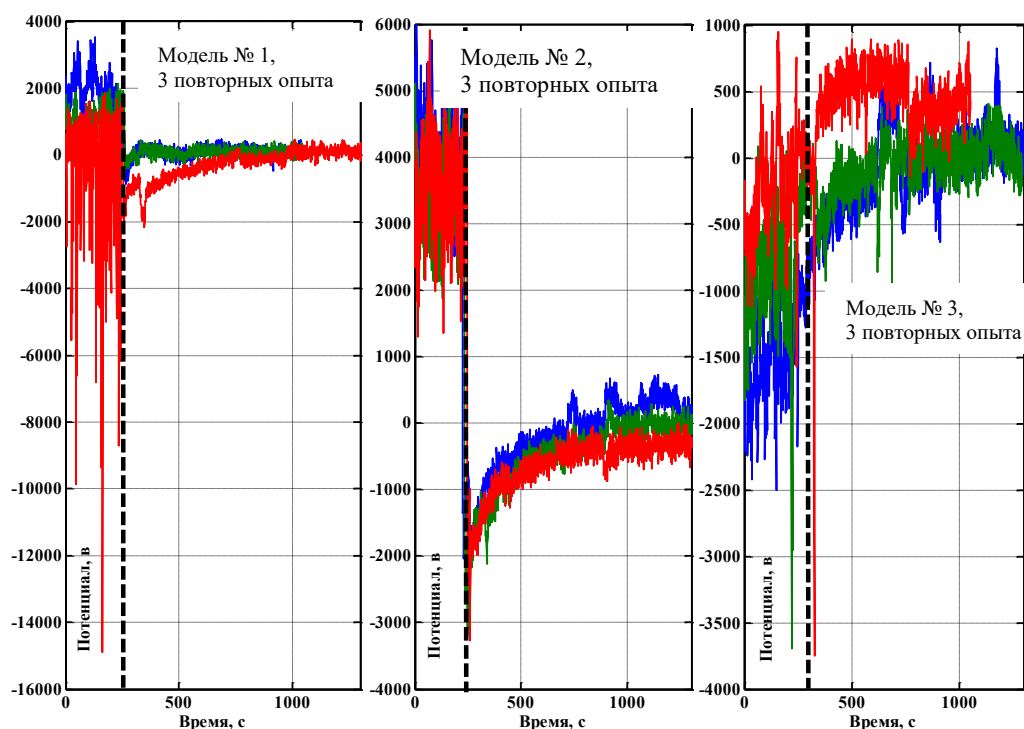


Рис. 4.62. Графики изменения напряженности ЭСП, 1 серия эксперимента

На первом графике (Модель № 1) накапливаемый заряд демонстрирует большие случайные выбросы обоого знака.

Скорость стекания заряда в двух опытах практически одинакова, в первом примерно в пять раз больше, чем у двух других. На втором графике (Модель № 2) все три опыта практически одинаковы: накапливается заряд с положительным потенциалом, но стекание происходит после резкой смены знака со значительной флуктуацией в зоне нулевого потенциала. В третьем графике (Модель № 3) и накопление, и время стекания заряда происходят с большой хаотической составляющей и переменным знаком потенциала на всем протяжении измерений. При этом скорость стекания заряда наименьшая по сравнению с первыми двумя вариантами. На всех трех графиках проведены вертикали, условно отмечающие начала второго этапа эксперимента (стекания заряда) в каждом из опытов.

2. Вторая серия эксперимента

Условия: 9 потоков данных, на 3 модели обуви (Модель № 1, Модель № 2, Модель № 3) по 3 повторных опыта. На рис. 4.63 показаны графики изменения напряженности ЭСП в течение опыта.

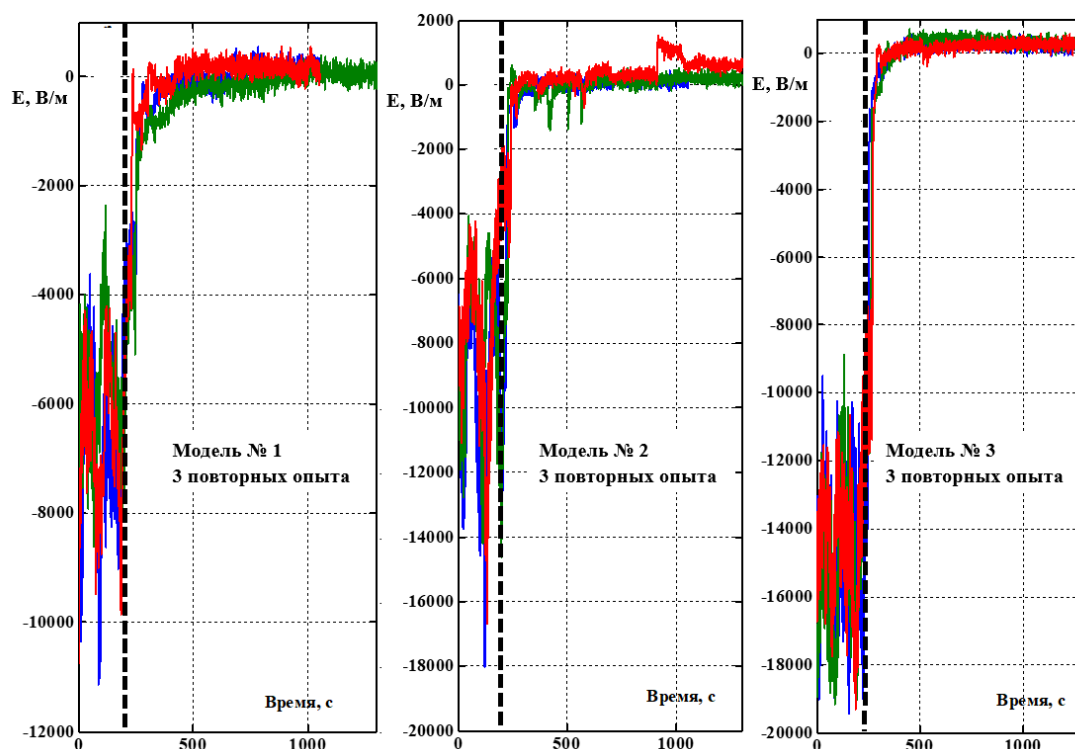


Рис. 4.63. Графики изменения напряженности ЭСП, 2 серия эксперимента

По графикам видно, что во всех вариантах повторные опыты дали идентичные результаты. Наибольшая скорость стекания заряда наблюдается у 1-ой модели обуви, наименьшая скорость – у 2-й. Накопление напряженности ЭСП и стекание заряда во всех трех графиках и всех повторных опытах проходят со значительной «шумовой» составляющей, создающей существенные трудности при количественных оценках.

3. Третья серия эксперимента

Условия: 9 потоков данных, на 3 модели обуви (Модель № 1, Модель № 2, Модель № 3) по 3 повторных опыта. На рис. 4.64 показаны графики изменения напряженности ЭСП в течение опыта.

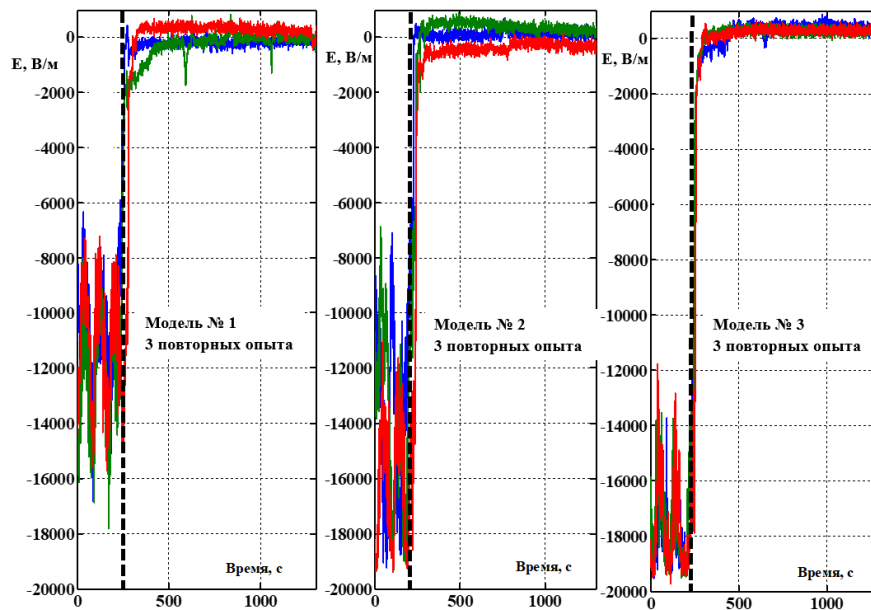


Рис. 4.64. Графики изменения напряженности ЭСП, 3 серия эксперимента

Сравнение графиков и повторных опытов показывают практически полную их идентичность в условиях большого уровня случайных вариаций. Наибольшая напряженность ЭСП наблюдается у Модели № 3, наименьшая у Модели № 1.

4. Четвертая серия эксперимента

Условия: 9 потоков данных, на 3 модели обуви (Модель № 1, Модель № 2, Модель № 3) по 3 повторных опыта. На рис. 4.65 показаны графики изменения напряженности ЭСП в течение опыта.

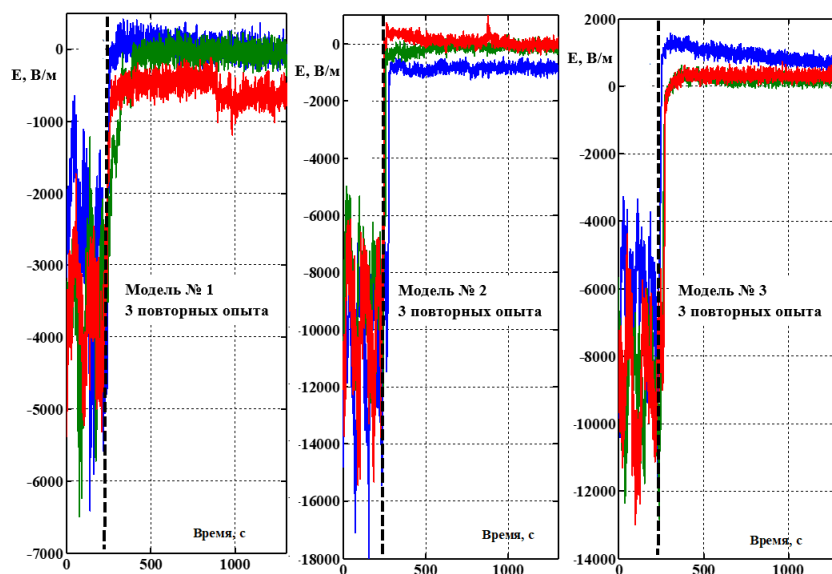


Рис. 4.65. Графики изменения напряженности ЭСП, 4 серия эксперимента

Визуальное сравнение графиков показывает нестабильность результатов по образцам: в каждом графике есть один опыт, у которого конечные результаты смещены относительно конечных результатов двух других опытов. Вместе с тем наблюдается подобие кривых и одинаковый характер случайной составляющей на обоих этапах эксперимента.

5. Пятая серия эксперимента

Условия: 9 потоков данных, на 3 модели обуви (Модель № 1, Модель № 2, Модель № 3) по 3 повторных опыта. На рис. 4.66 показаны графики изменения напряженности ЭСП в течение опыта.

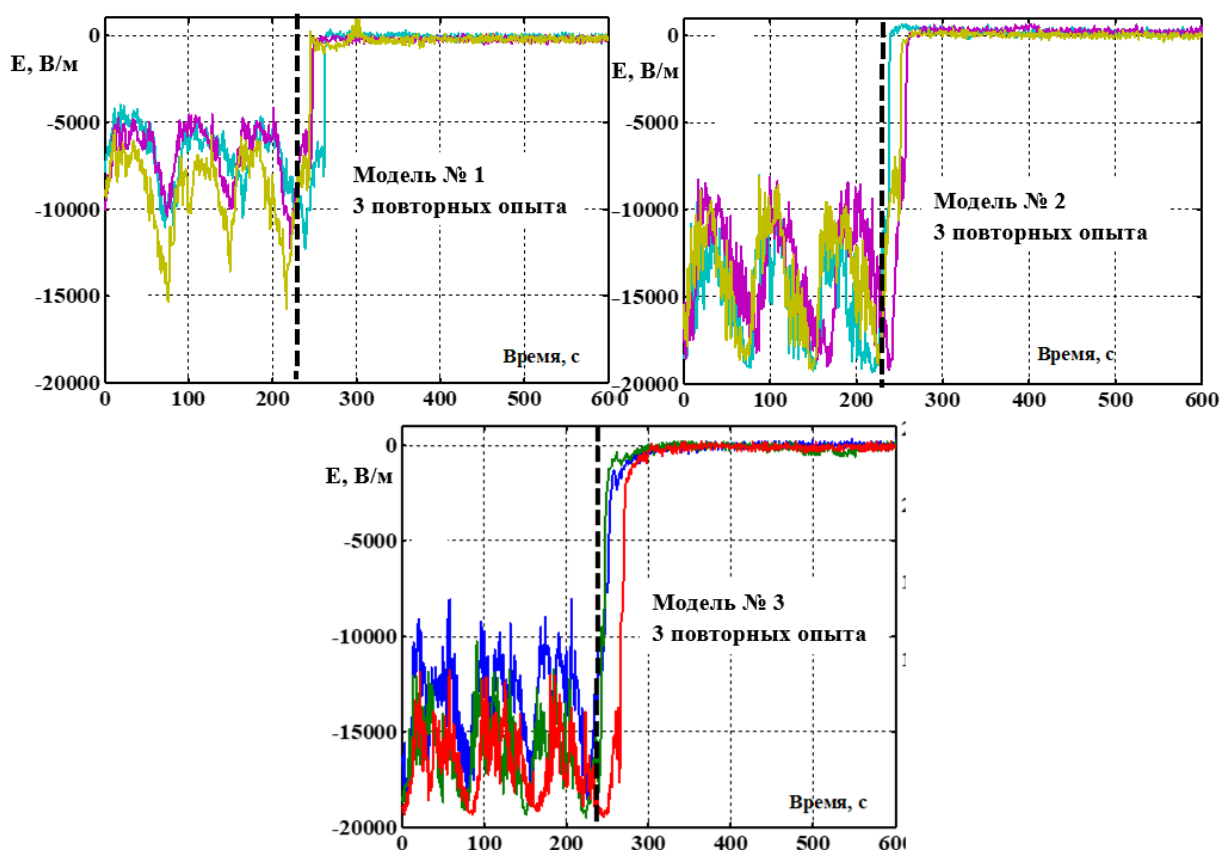


Рис. 4.66. Графики изменения напряженности ЭСП, 5 серия эксперимента

Во всех трех графиках на первом этапе эксперимента наблюдается четко выраженная периодичность в накоплении и стекании заряда во всех опытах при наличии существенной хаотической составляющей. Скорость стекания заряда во всех вариантах примерно одинакова, так как визуально по величине неразличима.

6. Шестая серия эксперимента

Условия: 9 потоков данных, на 3 модели обуви (Модель № 1, Модель № 2, Модель № 3) по 3 повторных опыта. На рис. 4.67 показаны графики изменения напряженности ЭСП в течение опыта.

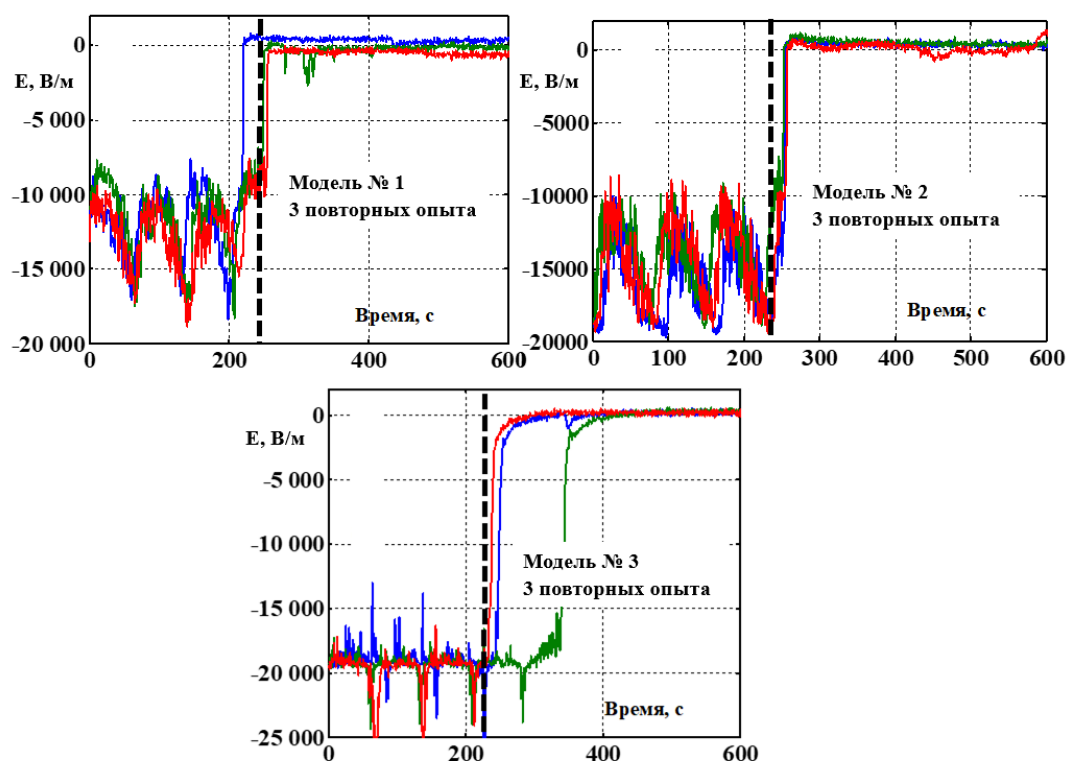


Рис. 4.67. Графики изменения напряженности ЭСП, 6 серия эксперимента

В опытах 3-ой модели обуви - относительно небольшие случайные шумовые составляющие, однако, с резкими большими выбросами. Один опыт заметно отличается от двух других по времени перехода ко второму этапу эксперимента.

7. Седьмая серия эксперимента

Условия: 9 потоков данных, на 3 модели обуви (Модель № 1, Модель № 2, Модель № 3) по 3 повторных опыта. На рис. 4.68 показаны графики изменения напряженности ЭСП в течение опыта. Результаты схожи с результатами эксперимента 6-ой серии эксперимента. Различие – в величине наибольшего среднего накопленного заряда. Большой разброс в средних уровнях и случайных вариациях не позволяет использовать простое усреднение значений, требуется специальное масштабирование данных перед статистической обработкой.

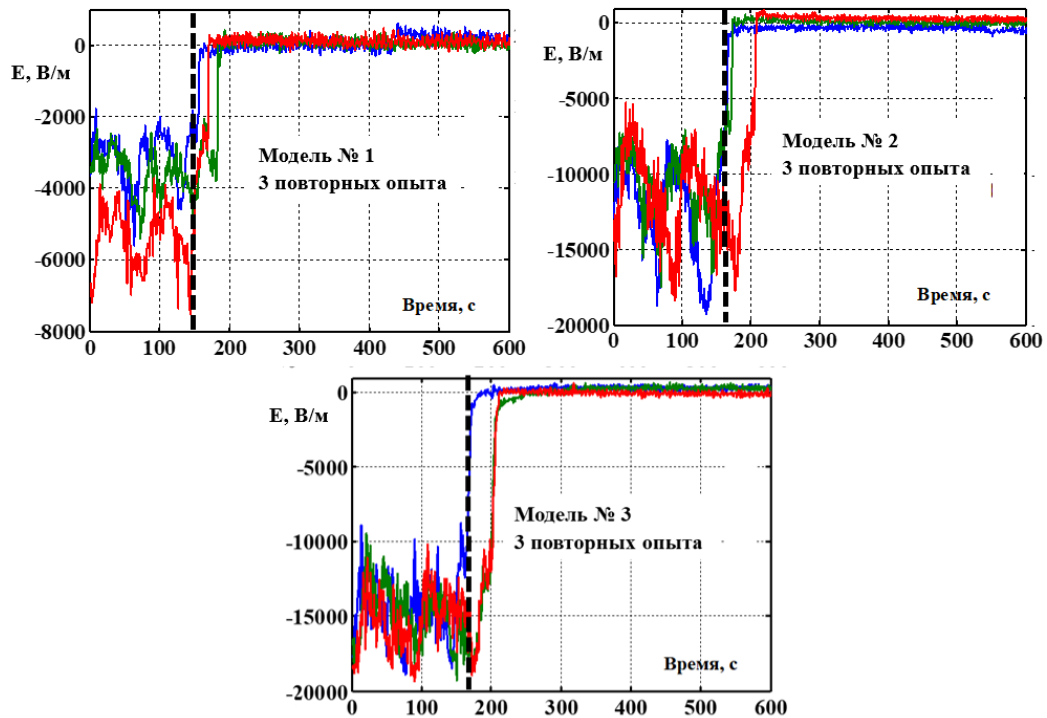


Рис. 4.68. Графики изменения напряженности ЭСП, 7 серия эксперимента

Для сравнения построена гистограмма распределения максимальных значений напряженности ЭСП (рис. 4.69) по каждой модели обуви в каждой серии испытаний.

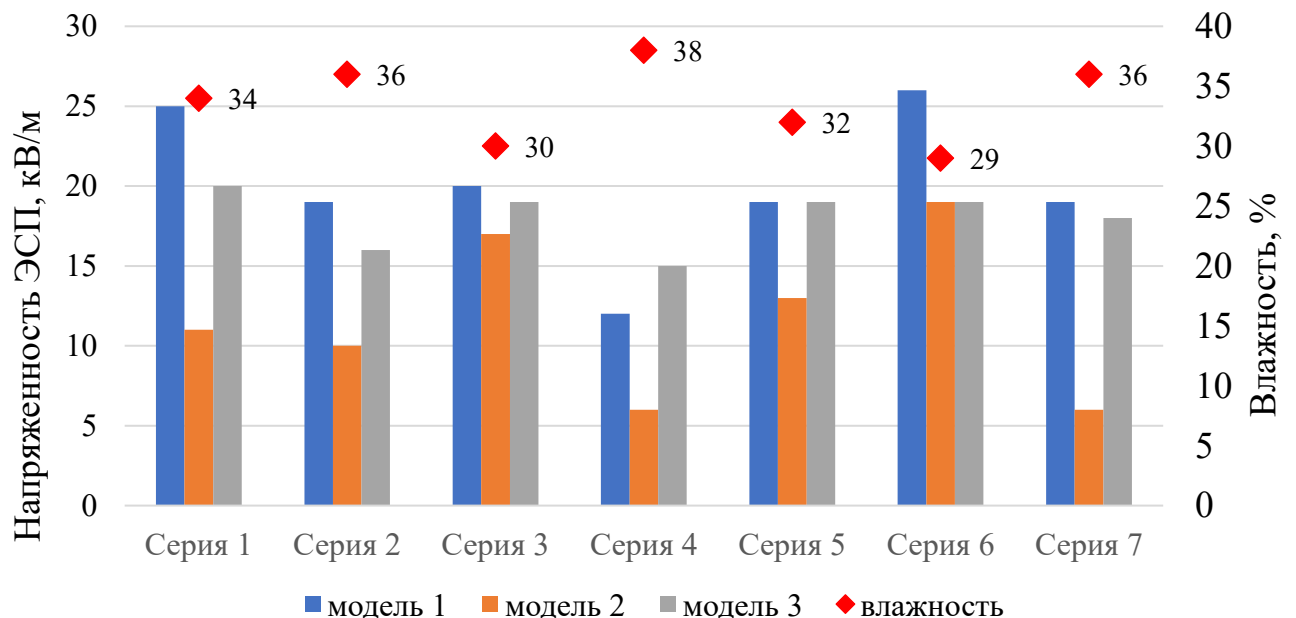


Рис. 4.69. Гистограммы распределения измерений максимальных значений напряженности ЭСП и влажности окружающей среды всех 7 серий испытаний

Так как испытания проводились в разные дни, то происходили некоторые изменения параметров окружающей среды. Температура составляла $(23 \pm 1)^\circ\text{C}$, а влажность менялись более значительно. Поэтому для сравнения на графике сделана визуализация значений влажности, на котором прослеживаются ее изменения. На гистограмме видно, что чем больше влажность воздуха, тем меньше значения напряженности ЭСП, как и у повседневной (Модель № 1), так и у антистатической обуви (Модель № 2 и 3).

В ходе 7-ой серии экспериментов проведены измерения постоянной времени релаксации ЭСЗ, которая показывает, как быстро заряд стекает с обуви. На основе полученных данных построена гистограмма (рис. 4.70). В каждой серии испытаний взято среднее значение постоянной времени релаксации по каждой модели обуви.

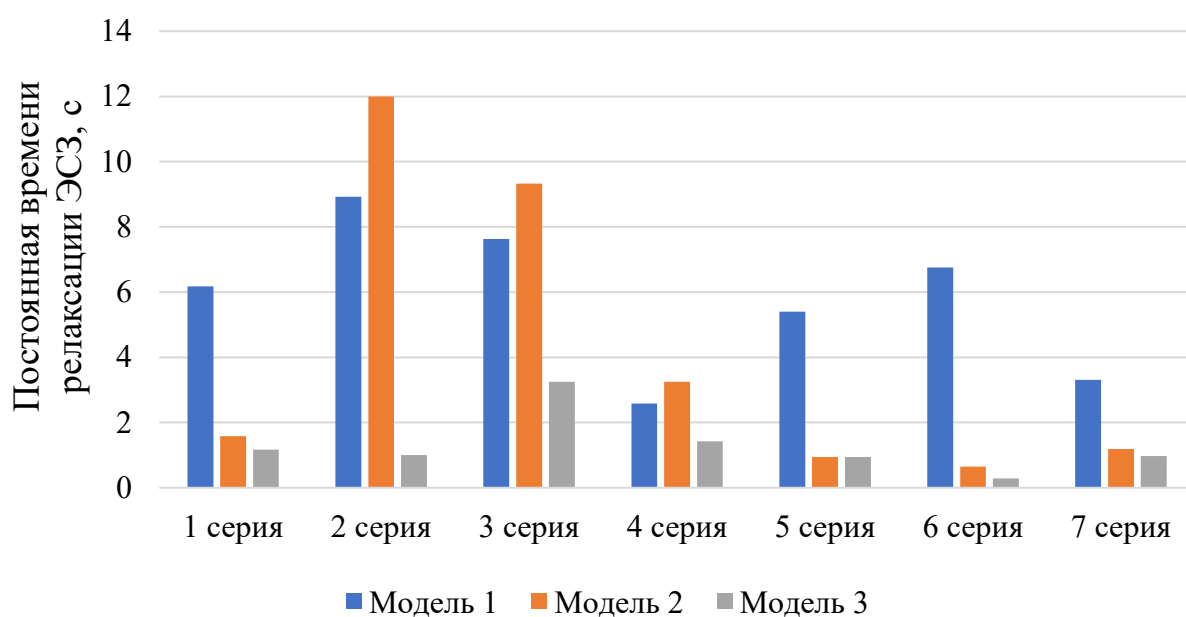


Рис. 4.70. Результаты изменений постоянной времени релаксации

Постоянная времени релаксации ЭСЗ колеблется между сериями и моделями. Модель 1 показала высокие значения практически во всех сериях, что может свидетельствовать о высоком удельном сопротивлении материалов низа. Из общей картины выпадает 4 серия испытаний, в которой влажность окружающего воздуха была 38 %. У Модели 2 наибольшие показания во 2 и 3 серии (9 и 12 секунд). Модель 3 имеет значительно более низкие значения постоянной времени

релаксации ЭСЗ по сравнению с двумя предыдущими моделями. Показатели остаются ниже 3 секунд во всех сериях, что может указывать на лучшие антистатические свойства этой обуви.

Таким образом, разработанный метод оценки антистатических показателей системы «обувь – человек - напольное покрытие» позволяет проводить измерения напряженности ЭСП и электростатического потенциала на теле человека, находящегося в различных типах специальной и повседневной обуви, в разнообразных климатических условиях, на различных напольных покрытиях, что дает возможность оценивать безопасность специальной обуви по показателям антистатического статуса, сертифицировать обувь по классам безопасности и контролировать электростатический заряд на теле человека при выполнении технологических операций.

ВЫВОДЫ ПО ЧЕТВЕРТОЙ ГЛАВЕ

1. Показано, что при моделировании накопления ЭСЗ на теле человека необходимо основываться на модели человеческого тела.

2. Разработан метод оценки антистатических показателей системы «обувь – человек - напольное покрытие» с использованием индикатора-регистратора ИРИ-04М, который позволяет проводить испытания в реальных условиях эксплуатации.

3. Разработан алгоритм методики исследования антистатических показателей системы «обувь – человек – напольное покрытие».

4. Экспериментально показано, что ЭСП вокруг тела человека имеет форму эллипсоида, а с увеличением числа элементов одежды поле возрастает.

5. Проведен анализ состоятельности методики исследования антистатических показателей системы «обувь - человек - напольное покрытие» методом Парето, по результатам которого выявлена необходимость установки более чувствительного малоинерционного термометра.

6. Установлена динамика стекания электрического заряда, накопленного на поверхности человеческого тела, при использовании различных моделей обуви в

системе «низ обуви – напольное покрытие» при нормальных условиях эксплуатации.

7. Разработана математическая модель на основе универсального метода адаптивного случайного поиска, который используется в задачах нелинейной регрессии, которая позволяет эффективно исследовать динамику накопления и стекания заряда, а также автоматически определять границу между ключевыми этапами эксперимента.

8. Проведен корреляционный и спектральный анализы динамики накопления ЭСЗ в системе «обувь - человек - окружающая среда». Исследование автокорреляционных функций (АКФ) и спектральной плотности дисперсии (СПД) показало пики на низких и высоких частотах практически на всех спектрах, что позволяет построить математическую модель динамики накопления заряда на поверхности человека при его движении по поверхности пола.

9. Разработана математическая модель динамики накопления заряда статического электричества, основанная на процессах зарядки и разрядки, которые можно представить конденсаторами, образуемыми элементами одежды и обуви. Модель включает поток прямоугольных импульсов, дополненный белым шумом, для учета случайных источников заряда. Анализ автокорреляционных функций (АКФ) и спектральной плотности показывает, что модель отражает низкочастотные колебания в накопленном заряде и отсутствие высокочастотных компонент, что соответствует характеру процесса.

10. Показано, что убывание электростатического потенциала подчиняется экспоненциальному закону. В рамках эксперимента проведена оценка скорости стекания заряда с использованием регрессионных моделей, построенных для девяти опытов. Статистическая обработка данных, включая анализ коэффициентов регрессии и оценку их значимости, продемонстрировала высокую степень корреляции между экспериментальными данными и моделью. Выявлено влияние варьируемого фактора на скорость стекания заряда. Результаты вычислений коэффициентов регрессий и коэффициентов достоверности Q_2 (0.941–0.986) подтвердили высокую валидность моделей.

ГЛАВА 5. РАЗРАБОТКА НАУЧНО-ОБОСНОВАННОЙ КОНСТРУКЦИИ АНТИСТАТИЧЕСКОЙ ОБУВИ

5.1. Анализ условий труда и производственных факторов предприятий нефтегазодобычи

Как следует из анализа рынка СИЗ и требований, предъявляемых к специальной обуви по отраслям производства (см. Главу 1), в рамках настоящей работы дальнейшие исследования следует сосредоточить на конструкциях, используемых в нефтегазовом комплексе, с одной стороны, в силу их наиболее широкого спектра защитных свойств, с другой – по причине наиболее серьезного ущерба, наносимого негативным воздействием зарядов статического электричества, с третьей – привлекательность залежей углеводородов в Арктике и на Крайнем Севере, о которых известно уже не первое десятилетие, но лишь в последние годы переход к полномасштабному освоению таких ресурсов, и доступ к ним стали технически и экономически обоснованными. Освоение нефтегазовых этих ресурсов сопряжено со значительными затратами и высоким уровнем риска. К основным сложностям, с которыми сталкиваются компании, в первую очередь относится суровый климат. Сильные практически круглый год морозы, продолжительная полярная ночь, угроза повреждения морских буровых установок арктическими льдами, болотистая тундра, обуславливающая сезонность деятельности во многих регионах, и ограниченная биологическая активность крайне отрицательно сказываются на персонале и оборудовании.

Вместе с тем, в арктических районах, в зоне Крайнего Севера России имеется достаточно большой опыт комплексной реализации задач по развертыванию центров добычи и производства топливно-энергетических ресурсов, освоению местных топливно-сырьевых баз, материально-техническому снабжению промышленных и коммунальных объектов [240].

Проведенный анализ характеристик условий труда на предприятиях нефтегазодобычи [240-243] показал, что абсолютное большинство работ, связанных с добычей нефти и газа, осуществляется на открытом воздухе, и только на отдельных этапах первичной подготовки и транспортировки газа работники всю смену находятся в производственных помещениях (машинисты насосных и компрессорных установок) [244].

Технологическое оборудование, размещенное на открытых площадках, требует постоянного контроля, технического обслуживания, проведения ремонтно- и пуско-наладочных работ, монтажных испытаний.

В связи этим работающие на нефтегазодобывающих предприятиях – специалисты различного профиля (мастера по ремонту оборудования, электросварщики, слесари - ремонтники, инженеры - технологи, ведущие инженеры и инженеры I-II категории, начальники цехов и др.). Организация их рабочих мест определяется выполнением тех или иных функций на различных этапах технологического процесса. Персонал нефтегазодобывающих предприятий подвергается воздействию комплекса климатических факторов в зависимости от места выполнения тех или иных работ, обусловленных потребностями производства [245-246].

Сочетание сурового климата Арктики с вредными условиями труда негативно сказывается на здоровье работников и течении многих профессиональных заболеваний (ПЗ) [247-250].

Сравнение условий труда при добыче полезных ископаемых по среднегодовому числу лиц, имевших контакт с тем или иным вредным производственным фактором, демонстрирует существенные различия между группами работников. В структуре вредных производственных факторов [61] нефтегазодобывающих предприятий значительная доля приходится на химические и биологические факторы, тяжесть труда, шум, инфразвук, неионизирующие электромагнитные поля и излучения, ионизирующее излучение (рис. 5.1).

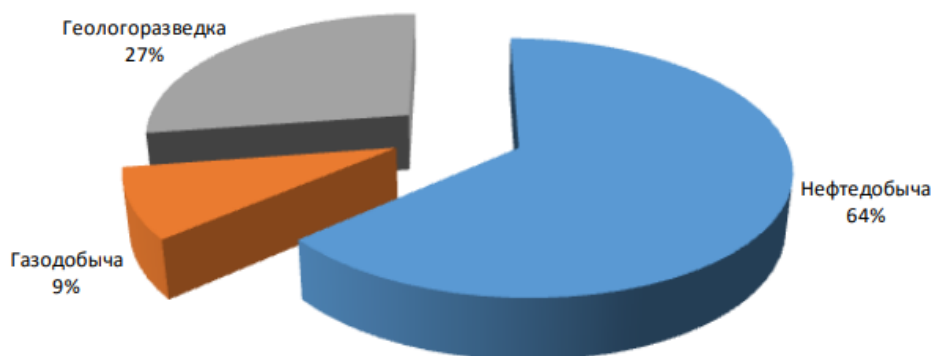


Рис. 5.1. Структура смертельного травматизма в нефтегазовой промышленности [252]

В то же время для обеспечения безопасных условий труда и сохранения здоровья работников необходимы достоверные знания, объективный учет характера и уровня воздействия различных факторов процессов производства [253]. В современных условиях это особенно актуально в связи с активным строительством и разработкой новых месторождений в Западной Сибири, Республике Коми, на острове Сахалин и др.

Активное, применение в этих районах современного технологического оборудования, оснащенного различными электронными системами управления, постоянное присутствие человека на объектах в опасных условиях атмосферной среды (атмосферы с высоким содержанием природного газа) требует учета влияния возникающих при этом электростатических эффектов. Высокий уровень накопления статического электричества на поверхностях специальной одежды, различных технологических конструкциях, полимерных материалах нарушает функционирование техно-биосистемы в целом и приводит к негативным для человека физиологическим последствиям при техногенных авариях и экологических катастрофах (взрывы на промышленных объектах с высокой концентрацией горючих газов в результате возникновения искры) [254].

С аналогичными проблемами сталкиваются и зарубежные нефтегазодобывающие предприятия. На промышленных предприятиях Аляски статическое электричество, как источник возгорания легковоспламеняющихся испарений, газов и пыли, является частым явлением [257]. Искра статического электричества может возникнуть, когда электрический заряд накапливается на

поверхности двух материалов, которые были соединены и впоследствии разъединены (между твёрдыми веществами, жидкостями и твёрдыми веществами, а также между двумя несмешивающимися жидкостями). Ниже приведены некоторые распространённые процессы, которые сопряжены с угрозой воспламенения от искры статического электричества:

- поток жидкости (нефть или смеси нефти и воды) в трубах и фильтрах тонкой очистки;
- оседание твёрдых частиц и взаимодействие несмешивающихся жидкостей (ржавчина или вода, смешивающиеся с нефтью);
- выброс частиц или капель из сопла (промывка водой или начальные стадии заполнения цистерн нефтью);
- интенсивное трение синтетических полимеров и последующее их разъединение (трение полипропиленовой веревки о ПВХ перчатки) [257].

Выявлены причины появления ЭСП при перекачке нефти по трубопроводам – соприкосновение двух тел, отличающихся фазовым состоянием, приводящее к образованию двойного электрического слоя.

Различают три механизма образования двойного электрического слоя:

- 1) преимущественное перемещение носителей зарядов из одного тела в другое – диффузия;
- 2) абсорбционные процессы на границе раздела, когда заряды преимущественно одной из фаз оседают на поверхности другой из-за снижения сил поверхностного натяжения одной из них большим поверхностным натяжением;
- 3) отсутствие обоих механизмов при поляризации молекул хотя бы одной из фаз.

Нарастание плотности заряда в нефти (можно сравнить с нарастанием зарядов на материале, который натирают) происходит в технологических устройствах, где осуществляется контакт нефти с материалами, приводящими к ее зарядке, и увеличивается скорость течения нефти. Спад заряда наблюдается при движении нефти по заземленным трубопроводам.

При движении нефти по технологическому тракту вплоть до приемного резервуара опасности от накопления заряда статического электричества практически нет, так как в аппаратах нет воздушных промежутков и возможности возникновения электрического пробоя в газе. Иная ситуация в приемном резервуаре, где обязательно наличие газового пространства над поверхностью нефти.

Специалистами China University of Petroleum [132] проведено предметное исследование аварий, которые связаны с влиянием и воздействием статического электричества на процессы хранения, транспортировки нефти и газа. Выявлено, что ненадлежащее выполнение процесса погрузки и разгрузки нефти является одной из самых частых причин аварий и составляет 29% от общего количества. Плохое заземление и накопление статического электричества на персонале являются вторым и третьим по значимости факторами – 24% и 13% соответственно. В числе несчастных случаев – плохое заземление резервуаров для хранения - приводило к воспламенению непосредственно от разряда статического электричества.

При этом отсутствие антистатической обуви и одежды на персонале является наиболее частой причиной накопления статического электричества. Известны случаи [132], когда авария в подземном нефтехранилище была вызвана воспламенением от воздействия статического электричества, образовавшегося на одежде и теле персонала.

Таким образом, электростатический разряд, образующийся на теле человека, является одной из основных причин воспламенения, поэтому в производственных условиях персонал должен быть обеспечен антистатической одеждой и обувью, а на входе в потенциально взрывоопасную территорию пройти зону заземления, чтобы снять статическое напряжение.

В целях предотвращения подобных аварий и/или смягчения их последствий, разработаны многочисленные технические требования и стандарты контроля статического электричества в промышленности, рассмотренные в Главе 1. Хотя, большинство компаний соблюдают эти стандарты и рекомендации, аварии,

связанные со статическим электричеством, тем не менее не редки, в том числе и в нефтегазовой отрасли.

Не приводя здесь статистику, отметим, что по данным МЧС, затраты на ликвидацию аварий с нефтепродуктом составляют от 1,5 до 10 млн. долларов [308-310].

Одной из крупнейших российских нефтегазовых компаний в мире является «ЛУКОЙЛ» [258-261], основная деятельность которой осуществляется на территории Уральского федерального округа РФ – на территории Ямало-Ненецкого и Ханты-Мансийского автономного округов – Югры. Представим климатическую картину Крайнего Севера на примере Ханты-Мансийского автономного округа. Климат умеренный континентальный, характеризуется быстрой сменой погодных условий, особенно осенью и весной, а также в течение суток. На формирование климата существенное влияние оказывает защищённость территории с запада Уральским хребтом, а также открытость с севера, способствующая беспрепятственному проникновению холодных арктических масс. Немаловажную роль играет равнинный характер местности с большим количеством рек, озёр и болот [262].

Климатический график Ханты-Мансийского автономного округа, представленный на рис. 5.2, демонстрирует полезные показатели типичных климатических особенностей и ожидаемых погодных условий (температура, количество осадков, солнечная погода или ветер). «Максимальная средняя суточная температура» (плотная красная линия) указывает на максимальную среднюю температуру в течение отдельных дней каждого месяца. Аналогично этому «Минимальная средняя суточная температура» (плотная синяя линия) указывает на минимальную среднюю температуру. Жаркие дни и холодные ночи (пунктирные красная и синяя линии указывают на среднюю температуру в самый жаркий день и самую холодную ночь каждого месяца в течение 30 лет [263, 256].



Рис. 5.2. Климатический график Ханты-Мансийского автономного округа

Зима за Полярным кругом длится в среднем 220-240 дней. Погода переходит на зимний режим уже в конце сентября - начале октября. Среднегодовая температура воздуха на всей территории округа отрицательная, от минус 1 °C на юго-западе до минус 9°C на северо-востоке. Средняя температура января до минус 23 °C. В отдельные годы температура воздуха зимой достигает до минус 40 °C и ниже [263].

Высокие уровни электризации человека вызваны снижением релаксации зарядов статического электричества при упругости водяного пара менее 1 мм рт.ст., фотоионизации воздуха, концентрации легких аэроионов воздуха в условиях ослабленного естественного фона радиации, обусловленного вечной мерзлотой поверхности земли, а также давления атмосферного воздуха при температуре ниже минус 20-25 °C.

Контроль потенциальной электризуемости диэлектрических материалов в диапазоне относительной влажности 10-80 % и температуры ± 40 °C позволяет оценить критическую температуру окружающего воздуха (минус 25 °C), ниже которой существенно замедляется релаксация (скорость утечки) зарядов статического электричества с поверхности одежды персонала и применяемых диэлектрических конструкционных материалов [273, 274, 370].

Снижение ионизации воздуха повышает электропрочность воздуха и приводит к увеличению энергии искры в потенциальных зазорах электроцепей и конструкциях оборудования [276], которая может существенно перекрывать минимальную энергию воспламенения W_v нефтепродукта (газопродукта).

Энергия W_v распространенных нефтепродуктов составляет 0,1-1 мДж, газопродуктов - от 0,05 до 1 мДж. Если оператор в зимней одежде имеет емкость $C_o = 200$ пФ и в результате электризации заряжен до потенциала $U_o = 20$ кВ, то максимальная энергия искры в случае соприкосновения тела человека с заземлением (по инструкции) составит $W_{\text{макс}} = C_o \cdot (U_o)^2 / 2 = 40$ мДж, что намного больше $W_v = (0,1-1,0)$ мДж и в условиях опасной концентрации газовой смеси приведет к взрыву [276].

Экспертная оценка рынка антистатической обуви показала, что персонал предприятий нефтегазодобычи работает в сложных температурных условиях, и обувь должна обладать всеми факторами защиты в широком диапазоне температур. Кроме того, такая спецобувь должна:

- иметь масло- и нефтестойкую подошву с противоскользящим протектором;
- обеспечивать абсолютную герметичность крепления подошвы методом вулканизации;
- иметь защиту стопы со всех сторон, стальной или композитный подносок;
- обладать антистатическими свойствами в интервале температур $\pm 40^\circ\text{C}$.

5.2. Исследование антистатических свойств специальной обуви в реальных условиях эксплуатации

Проведение испытаний специальной обуви для проверки ее электростатической безопасности в реальных условиях эксплуатации имеет несколько важных аспектов. Прежде всего они подтверждают, что обувь действительно обеспечивает защиту от статического электричества в особых

условиях работы. Во-вторых, при эксплуатации в рабочей среде обувь может загрязниться, и, как следствие, ухудшиться ее антистатические свойства. Испытания помогут определить, насколько быстро и эффективно зарядное устройство рассеивает заряд в условиях, «эвтрофикации», например, пылью, глиной или снегом. В-третьих, в соответствующих условиях они позволяют оценить, как обувь ведет себя в течение длительного времени и при различных механических нагрузках.

Необходимо учитывать, что полимерные материалы, из которых изготавливаются детали низа обуви, в течение эксплуатации в различных условиях окружающей среды могут изменять исходные значения удельного поверхностного и объемного электрического сопротивлений.

При сорбции паров воды из воздуха на поверхности структурных элементов материалов в результате электролитической диссоциации водорастворимых солей образуются электролиты, которые выступают в качестве проводящей среды материала. Поэтому гидрофильные материалы при нормальных атмосферных условиях приближаются по свойствам к полупроводникам. Увлажнение до 100 % и более приводит к тому, что материалы могут стать проводниками и опасными для жизни человека. Снижение же влажности воздуха до 20-30 %, что характерно для условий Крайнего Севера, приводит к повышению электростатической опасности, так как низкая влажность затрудняет безопасное рассеивание накапливаемого статического электричества.

Нами проведены испытания моделей специальной обуви (сапоги), которые используют для работы на открытом воздухе в межсезонный период на предприятиях нефтегазодобычи. Сапоги кожаные на застежке «молния», защищают стопу от падения тяжелых предметов, имеют вкладную антистатическую стельку, амортизатор в пяточной части и мягкий кант, подошва ПУ (полиуретан) /ТПУ (термополиуретан) с высотой протектора не менее 4 мм.

Испытуемые образцы изготовлены в соответствии с ГОСТ 28507-99 «Обувь специальная с верхом из кожи для защиты от механических воздействий. Технические условия (с Изменением N 1)», соответствует требованиям, указанным

в табл. 5.1 [162], и ТР ТС 019/2011 «О безопасности средств индивидуальной защиты» [22].

Табл. 5.1. Требования к специальной обуви с верхом из кожи по ГОСТ 28507-99 [162]

Вид обуви	Половозрастная группа обуви	Размер обуви по ГОСТ 11373 [406]	Количество полнот	Условное обозначение защитных свойств обуви по ГОСТ 12.4.103
Сапоги	Мужская	240-307	2	Мун 5; Мун 15; Мун 25; Мун 50; Мун 100; Мун 200; Мп; Ми; Мут 3; Мул 2; Муб 1

Для придания обуви дополнительного антистатического эффекта нами предложена экспериментальная конструкция, включающая насадки с заземляющими элементами, надетыми на подошву (рис. 5.3). От заземляющих элементов через корпус системы сопротивления к вкладной антистатической стельке идут провода [256].



Рис. 5.3. Общий вид модели специальной обуви с заземляющей конструкцией

Для исследования антистатических свойств специальной обуви с заземляющими насадками проведен ряд испытаний по методике, описанной в Главе 4, согласно которой прибор укреплялся на верхней одежде испытуемого при его передвижениях по мерзлому грунту с регистрацией напряженности ЭСП в течение 5-ти минут [256]. При испытаниях в условиях Крайнего Севера проводился контроль влажности и температуры: 78 % и -20 °С. Результаты испытаний представлены на рис. 5.4.

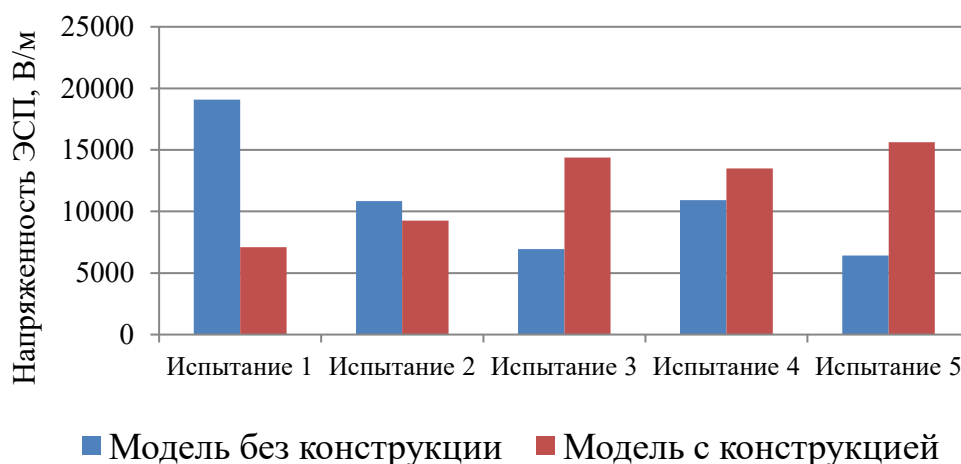


Рис. 5.4. Распределение напряженности ЭСП моделей с насадками и без в условиях Крайнего Севера

При сравнении значений напряженности ЭСП, модель с насадками демонстрирует положительные результаты на протяжении первых 2-х испытаний: напряженность ЭСП не превышает 10 кВ/м. У модели без насадок напряженность ЭСП превышает 17 кВ/м в первом испытании. В третьем, четвертом и пятом испытаниях модель с насадками показывает результаты хуже, чем модель без них. Однако, показатели не превышают отметки 15 кВ/м.

Кроме испытаний в северных климатических условиях, проведены лабораторные испытания при температуре 23 °С и относительной влажности воздуха 55 %, результаты которых представлены на рис. 5.5.

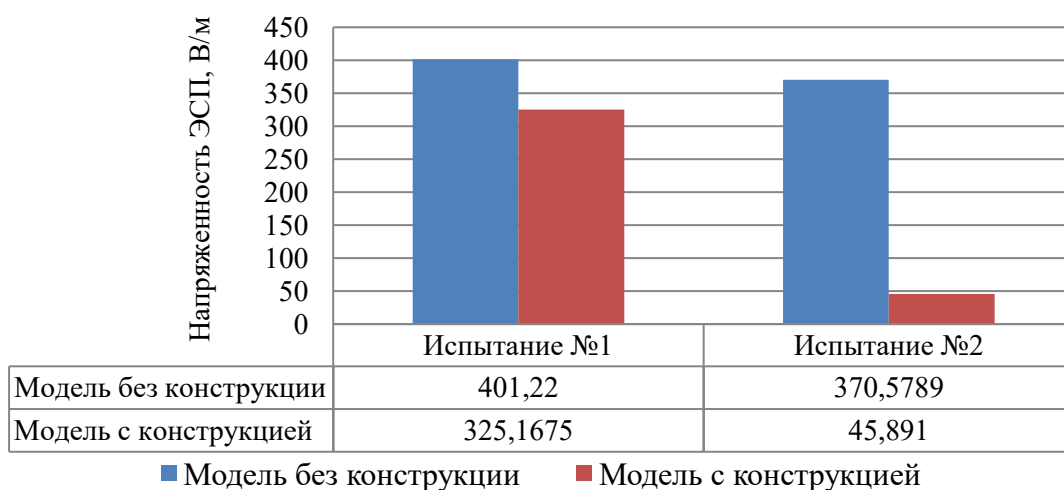


Рис. 5.5. Сравнение значений напряженности ЭСП моделей с насадками и без в лабораторных условиях

Следует отметить, что напряженность ЭСП при испытаниях обуви в лабораторных условиях не превышает 0,5 кВ/м. Это еще раз доказывает влияние климатических условий на значение антистатических показателей при эксплуатации специальной обуви.

По результатам испытаний можно заключить, что предложенная экспериментальная конструкция хотя и проявила себя положительно в лабораторных условиях, но не отвечает климатическим условиям Крайнего Севера. Это может быть связано с недостаточным контактом элементов конструкции со снежным покровом. При температурах ниже -10°C большинство грунтов не проводит электрический ток, а сухой снег становится практически изолятором [268]. Местности, где среднегодовая температура отрицательна, а в зимний период достигает значений минус 20°C и ниже, требуются более сложные заземляющие устройства, либо другие способы защиты персонала (выравнивание потенциала, проводящие площадки и др.). Несмотря на большую разницу в средних значениях напряженности ЭСП, которая обусловлена изменением климатических условий при проведении испытаний, показатели не превышают допустимых значений, установленных ГОСТ ИЕС 61340-4-3-2020 [13]. Дальнейшие направления решения данной проблемы сводятся к следующему:

- подбор или разработка материалов одежды и обуви персонала с оптимальными антистатическими свойствами для отрицательных температур, которые позволят резко снизить ЭСП персонала;
- оборудование проходов для обслуживания взрывоопасных объектов настилами с заземляющими свойствами и свободными от снега.

5.3. Разработка концепции конструкции антистатической обуви с заземляющими свойствами

Четвёртую промышленную революцию обычно характеризуют следующие собирательные понятия: всемирная сеть, интернет вещей, виртуальная и дополненная реальность, 3D-печать, печатная электроника, квантовые вычисления,

блокчейн и др. Особого внимания заслуживает «Умные СИЗ» или SMART СИЗ – это СИЗ с расширенной функциональностью, которые «активно реагируют» на параметры тела или рабочего места с помощью сенсорных датчиков для измерения параметров и сбора данных, внутренней передачи данных, обработки данных и внешней коммуникации. Основные тренды в области СИЗ: датчики с компьютерным зрением и технологии дополненной реальности; интерактивные карты работников; мобильные приложения различных уровней; облачные базы данных; компактные высокотехнологичные приборы для рабочих, позволяющие контролировать условия работы сотрудников промышленных предприятий; встроенные системы безопасности, и т.д. [311]

Все эти тенденции определяют новый подход - «DESA» - Digital Ergonomics and Safety Assistants – цифровая эргономика и помощь в безопасности – технологии, которые призваны снизить количество несчастных случаев и чрезвычайных происшествий на производстве.

В настоящее время приобретает актуальность конструирование и проектирование узкопрофессиональных изделий, учитывающих всю специфику конкретного вида промышленности и различных отраслей производств. Это в полной мере относится и к антистатической обуви [277]. Функционал проектируемой антистатической обуви, как средства индивидуальной защиты, при сохранении антистатических свойств можно обеспечить различными методами:

- использовать специальные материалы (углеродные, токопроводящие ткани, антистатические волоконные нити, мембраны);
- обеспечить условия для стекания заряда.

Для обоснованной разработки концепции антистатической обуви проведен анализ современных типов специальной обуви и патентный поиск их аналогов, которые показали, что всё большее распространение получают две группы устройств: различные заземляющие элементы и смеси, имеющие химическую составляющую [233].

Рассмотрим первую группу. Проводящая обувная скоба [206], представляющая собой проводящий контур, который содержит верхний и нижний

обувной проводящий контур, образованный соответственно верхним и нижним проводом. Верхний провод контактирует с нижней частью стопы человека, а нижний провод – с полом. Так обеспечивается стекание статических зарядов от человека к полу. Контур демонстрирует простоту и легкость изготовления, высокую долговечность и низкую стоимость [233].

Обувь с системой электростимуляции [207] включает электропроводящую электродную часть, которая изготовлена из гибкого материала, обеспечивающего подачу электроэнергии через контроллер, установленный на мягкой подошве. Электрод (непосредственно контактирующий с нижней частью стопы) создает хороший контакт благодаря широкой контактной площади, что способствует успешной подаче электрического тока.

Обувная перфорированная стелька [208], включающая спиральную заземленную через перфорации в подошве обуви нить, изготовленную из натурального проводящего материала, обеспечивает стекание статического электричества.

Подошва [209] со встроенным пьезоэлектрическим керамическим элементом, который приводится в действие путем генерирования разряда тока, имеет отдельно включенные в неё аккумуляторные батареи, служащие для зарядки и приведения в действие элемента. Когда пьезоэлектрический элемент прекращает свою работу, батареи излучают длинные инфракрасные волны или анионные токи, положительно влияющие на здоровье стопы носчика [233].

Электронное устройство [210], включает два элемента, один из которых размещён на стельке, а другой на подошве обуви. Элемент, размещённый на стельке, контактирует с верхом подошвы и направлен к пользователю, а подошвенный элемент – к земле. Встроенное в подошву электронное устройство включает электрическую схему. Подложка поддерживает схему и приспособлена для установки в подошве. Электронные компоненты, находясь между первым и вторым контактными концами, одновременно осуществляют заземление электростатических зарядов и изоляцию от электрических разрядов [233].

Антистатическая подошва [211] снабжена прокладкой, расположенной

между подошвой и стелькой. В прокладку встроен бескорпусный резистор., который включает в себя соединительные штыри на каждом из двух противоположных концов. Два соединительных штыря резистора электрически подсоединены к подошве и стельке, соответственно. Поскольку резистор не имеет открытых проводов, их повреждения можно избежать. Кроме того, антистатический эффект может быть улучшен, так как сопротивление резистора стабильно.

Сенсорная система [212], адаптированная для обувного изделия, включает в себя вставной элемент, содержащий первый и второй слой; порт, который соединен с вставкой и сконфигурирован для связи с электронным модулем; множество датчиков силы и давления на вставном элементе, множество проводов, соединяющих датчики и порт [233].

Обувь [215] имеет несколько проводящих элементов, проходящих через всю толщину стельки. Каждый элемент содержит в себе, по меньшей мере, один провод, выполненный из электропроводящего материала и магнит, в соответствующем корпусе.

Электростатический сборный ботинок [217] включает проводящую полосу, приклеенную на поверхности пяточной части внутренней подошвы.

Австрийские разработчики предлагают изготавливать подошвы из электропроводящего материала с контактным электродом, который соединен с подошвой внутри обуви [220]. Улучшение состояния здоровья и самочувствия может быть достигнуто установкой, по меньшей мере, одного постоянного магнита в средней части подошвы.

Испанские изобретатели предлагают конструкцию антистатической обуви, содержащей устройство, нейтрализующее статическое электричество [222]. По существу, это стелька, поддерживающая ногу пользователя, оборудована элементами, проводящими статическое электричество. Подошва содержит печатную плату, которая, в свою очередь, соединена с заземляющим элементом.

Антистатические бахилы [218] – ботинки с настрочными берцами, имеющие гибкое отверстие и проводящую ленту, которая пришита к нижней стороне обуви

почти по всей длине. В пяточной части проводящая полоса расположена по направлению вверх и вдоль одной стороны отверстия. Свободный конец проводящей полоски прикреплен с другой стороны отверстия, образуя петлю, которая придавливается пяткой во время носки обуви.

Предложенная американскими разработчиками обувь с электростатическим заземлением включает подошву, скрепленную с верхней частью обуви, стельку и электропроводящий элемент, выполненный в виде одной или нескольких заклепок, соединяющих подошву со стелькой и обеспечивающих надежный электрический контакт между телом пользователя и землей [224].

Устройство из сборной площадки, проходящего до земли электрического пути к резистору [225], может быть легко установлено в любом типе обуви и обеспечивает заземляющий путь через обувь к источнику рассеивания статического электричества. Конструкция предотвращает или значительно снижает воздействие электростатического разряда на персонал и его одежду. В качестве альтернативы резисторный провод используется для проведения статического электричества к земле. Это устройство способствует повышению уровня комфорта обуви, устраняя или значительно снижая вредные и раздражающие эффекты электростатического разряда без какого-либо влияния на внешний вид или функциональность изделия.

Японские технологи рекомендуют использовать нитевидный элемент из проводящих волокон [227]. Прикрепленный к контактирующей с грунтом стороне подошвы обуви, он способствует образованию коронного разряда, который нейтрализует статическое электричество, возникающее вследствие трения между обувью и землей. Таким образом, обуви придаётся антистатическая функция, которая обеспечивается присоединением нитевидного элемента, образованного из электропроводных волокон, к подошве, контактирующей с грунтом.

Конструкция антистатической обуви [231] включает в себя подошву с электропроводящими элементами и стельку, которая содержит две расположенных продольно от пятки к носку гигиенических вставки. Таким образом, электропроводящие элементы проходят через подошву и стельку, обеспечивая

электрический контакт стопы с землей, что устраняет воздействие тока на тело человека

Российскими разработчиками предлагается антистатический комплект, в виде костюма из ткани, содержащей электропроводные нити, и пары обуви, в подошву которой интегрированы газовые разрядники перенапряжения с заданным напряжением пробоя. Таким образом, комплект может быть использован для обеспечения периодического снижения напряженности электростатического поля [230].

Ко второй группе приспособлений, обеспечивающих снижение воздействия электростатического напряжения, можно отнести, компоненты, имеющие химическую составляющую, то есть всевозможные присадки. Электропроводящие подошва и стелька [213] скреплены безизоляционным адгезивом, изготовленным из проводящего материала, преимущественно из этиленвинилацетата [233].

Для изготовления антистатической обуви [214] используется смесь на основе эпоксидированного натурального каучука. Такие смеси могут быть получены как методом внутреннего механического перемешивания, так и открытым методом помола. Эти методы коммерчески привлекательны благодаря практичности и высоким объемам производства. Добавление в вулканизируемую смесь серы или перекиси не влияет на ее электрические свойства. Вулканизированные смеси, приготовленные для этой инновации, показывают такие электрические свойства как низкое электрическое сопротивление порядка 10^1 Ом, хорошие механические свойства с пределом прочности на разрыв 26,0 МПа. Уровень черного цвета всех вулканизированных смесей регулируется. Показатели электрических и механических свойств потенциально привлекательны для применения в производстве антистатической обуви [233].

Антистатическая обувь [216] состоит из статических диссипативных (рассеивающих) материалов, одна часть которых расположена на стельке в положении, обеспечивающем контакт с ногой пользователя, а другая - вдоль всей нижней стороны подошвы. Электропроводящий путь образуется между телом пользователя и землей, и, таким образом, разряжается статический заряд.

Китайские технологи рекомендуют изготавливать обувь [219], между подошвой и стелькой которой располагается наполнитель. Проводящая среда, взаимодействующая сверху вниз, проникает через наполнитель, стельку и внутреннюю подошву. Один конец проводящей среды контактирует с нижней поверхностью стопы на верхней поверхности стельки, а другой – с антистатической подошвой, выполняя функцию заземления.

Стелька для устранения статического электричества, разработанная корейскими технологами, [221], включает верхний слой, выполненный из проводящего синтетического материала, средний слой - из антистатической мягкой пены и нижний слой - из твердой синтетической резины. Между мягкой пеной среднего слоя и жестким слоем синтетической резины вставляется пара сегнетоэлектрических элементов и электроразрядная сеть. Стелька простой структуры может быть использована в разных типах обуви, в том числе и защитной для различных производственных условий. Конструкция может эффективно устранить статическое электричество, вырабатываемое телом человека. Таким образом, стелька может предотвратить не только различные несчастные случаи, такие как взрыв и пожар, которые происходят вследствие образования статического электричества в промышленных зонах, но и различные несчастные случаи, такие как электрошок, травмы, и неприятные ощущения, вызванные электрическим разрядом, которые возникают вследствие образования статического электричества.

Американские инженеры разработали модель подошвы из изоляционного материала для обуви, поддерживающей ногу над поверхностью земли [223]. Верхняя поверхность подошвы сконфигурирована для поддержки стопы, а нижняя – для контакта с поверхностью опоры. Хотя бы один вмонтированный в подошву контакт проходит между верхней и нижней поверхностями. Контакт из электропроводящего материала сконфигурирован таким образом, что поток электрического тока проходит между стопой, прилегающей к верхней поверхности подошвы и поверхностью земли, соприкасающейся с опорной поверхностью подошвы.

Обувь для повышения физической работоспособности человека путем создания электрического контакта между телом и землей включает в себя подошву из токопроводящей резины [226]. Упругий проводящий элемент составляет единое целое с подошвой и проходит вдоль внешней поверхности пяточной части обуви. Лента проходит по внутренней стороне обуви и вступает в контакт с проводящей стелькой. Таким образом, нога находится в постоянном электрическом контакте с подошвой. Проводящая стелька может быть использована для обеспечения более надежного электрического пути к стельке и, как следствие, к земле.

Обувь для «чистых помещений» обеспечивает отсутствие статического электричества путем создания заземляющих, сформированных из пластикового материала, содержащего вулканизированный термопластичный материал и антистатический агент контактных выступов, на ходовой и внутренней поверхностях подошвы. Таким образом, заземляющие контактные выступы, имея достаточно малые размеры, обеспечивают контакт с полом при использовании обуви на «чистом производстве» [228].

Итальянские изобретатели предлагают способ [229] изготовления антистатической обуви, включающий в себя: 1) закрытую пресс-форму, внутри которой имеется полость, приблизительно соответствующая форме обуви и штифты, такой высоты, чтобы в закрытом положении пресс-формы, своим верхним концом примыкали к внутренней поверхности полости, образуя опорную поверхность стопы пользователя; 2) нагрев внутренней стенки полости и вливание в нее жидкого этилвинилацетата; 3) удержание формы в закрытом положении до тех пор, пока пластический материал не затвердеет и не получится обувь, в подошве которой находится по крайней мере, один паз, который соединен с одним или более отверстиями, одно из которых сквозное; 4) открывание формы и экстракция полученного изделия; вставка в обувь колодки для ограничения ее усадки при охлаждении пластикового материала.

Изделие [232] из непроводящего субстрата и покрытия на нем, которое может быть использовано для производства мембраны, фильтрующих элементов, вентиляционных элементов, облицовочных покрытий, текстильных материалов,

слоистых материалов, сенсоров диагностических устройств. Покрытие выполнено из композиции, содержащей комплекс ионного фторполимера и противоионного агента, включающего поверхностно заряженные наночастицы. Покрытие на непроводящем субстрате получают в несколько стадий. Сначала получают смеси ионного фторполимера и поверхностно заряженных наночастиц, затем наносят смеси на субстрат. Способ позволяет изготавливать изделия с разнообразными свойствами: антистатическими, противомикробными, огнеупорными.

В разработках российских и зарубежных исследователей по совершенствованию технологических и конструктивных характеристик антистатической обуви для снижения электростатического поля предлагаются как новые материалы, так и различные конструкторские инновации [233].

Таким образом, в последнее время наблюдается тенденция использования различных «закладок» в конструкцию обуви в виде проводящих элементов - стелек, проводов, полос, резисторов, а также различных электронных устройств, которые должны обеспечить антистатические свойства.

Анализ показал необходимость совершенствования существующих технологий и конструктивных характеристик антистатической обуви.

Известно, что в соответствии с ГОСТ Р ЕН ИСО 20347-2013 «Средства индивидуальной защиты ног. Обувь специальная. Технические требования» [19] и ГОСТ Р ЕН ИСО 20345-2011 «Средства индивидуальной защиты ног. Обувь защитная. Технические требования» (п. 6.2.2) [18] обувь является антистатической, если электрическое сопротивление низа обуви находится в диапазоне $1 \cdot 10^5 \text{ Ом} \leq R_{AC} \leq 1 \cdot 10^9 \text{ Ом}$. При этом электропроводящая обувь с электрическим сопротивлением в диапазоне $R_{AC} \leq 1 \cdot 10^5 \text{ Ом}$ может послужить причиной риска поражения электрическим током от электрооборудования или деталей, находящихся под напряжением. Электропроводящая обувь позволит электрическому току пройти «сквозь» человека, что может крайне негативно сказаться на его здоровье. В то время как антистатическая обувь с электрическим сопротивлением в диапазоне $1 \cdot 10^5 \text{ Ом} \leq R_{AC} \leq 1 \cdot 10^9 \text{ Ом}$ ограничивает электрический ток, который не нанесет вреда здоровью человека.

Нижнее значение $1 \cdot 10^5$ Ом для электропроводной обусловлено требованием электробезопасности при работе на объектах с электрическими сетями и выбирается из условий ограничения максимального тока, проходящего через тело пользователя при контакте с токопроводящими частями оборудования. Верхнее значение сопротивления $1 \cdot 10^9$ влияет на накопленный электростатический потенциал пользователя и определяется скоростью стекания электрического заряда с тела человека, которое является проводником и получает трибоэлектрический заряд от одежды при движении. Проводящий низ обуви позволяет стекать накопленному заряду с тела человека на землю, обеспечивая антистатические свойства изделия.

Недостатки антистатической обуви, на современном российском рынке, связаны с технологическими трудностями изготовления низа с заданными электрическим сопротивлением. Если же при изготовлении антистатической обуви удастся достигнуть нужного электрического сопротивления низа за счет вводимых антистатических присадок в его композитный состав, то эти свойства либо полностью теряются, либо деградируют в процессе носки. Кроме того, классические конструкции антистатической обуви, не позволяют оптимизировать значение сопротивления R_{AC} для конкретных производственных условий. В данном случае с помощью заявленного устройства можно задавать электрическое сопротивление, обеспечивая нормированную проводимость для стекания заряда.

Нами предложена конструкция антистатической обуви с заземляющими свойствами [304]. Полезная модель относится к обувной промышленности, в частности, к производству антистатической обуви и может быть использована для удобства и безопасности при эксплуатации (нефтегазоперерабатывающая отрасль, работа с электроникой и т.д.).

Наиболее близким прототипом испытуемого образца антистатической обуви с заземляющими свойствами является антистатическая обувь, описанная в патенте на полезную модель № TW 2010205833 (A1) [211], которая снабжена чип-резистором, расположенным между подошвой и стелькой. Резистор включает в себя соединительные штыри на каждом из двух противоположных концах. Два

соединительных штыря резистора электрически подсоединены к подошве и стельке, соответственно. К недостаткам описанной обуви, принятой за прототип, можно отнести то, что стелька снабжена вторым проводящим элементом, имеющим громоздкую конфигурацию на протяжении всей длины стельки, что в свою очередь неудобно при технической сборке конструкции. Кроме того, материал ходовой поверхности антистатической обуви не является электропроводным.

Следующий прототип - конструкция антистатической обуви, описанная в патенте № ES 2005077217 (A1) [222], содержащая устройство, нейтрализующее статическое электричество. Изобретение представляет собой стельку, которая поддерживает ногу пользователя и, которая оборудована элементами, проводящими статическое электричество. Подошва включает печатную плату, которая, в свою очередь, соединена с заземляющим элементом. Однако у данного устройства имеется существенный недостаток, связанный с неравномерностью распределения электрического сопротивления элементов деталей обуви, а также тем, что, проводящий элемент, находящийся в ходовой части подошвы, не защищен от загрязнений и его антистатическая функция будет снижена во время эксплуатации, при этом возможность замены печатной платы или ее элементов отсутствует.

Технической задачей разрабатываемой полезной модели является создание специальной антистатической обуви с заземляющими свойствами, с устойчивыми показателями электрического сопротивления для защиты от электростатических полей, оптимальный номинал которого может выбираться для конкретного режима использования изделия.

Техническим результатом полезной модели является обеспечение антистатических свойств обуви, за счет повышения устойчивости ее показателей электрического сопротивления, реализуемых с помощью платы со сменным резистором стабильного электрического сопротивления, которое можно контролировать. На рис. 5.6 представлена эквивалентная электрическая схема, которая моделирует работу заземляющего устройства.

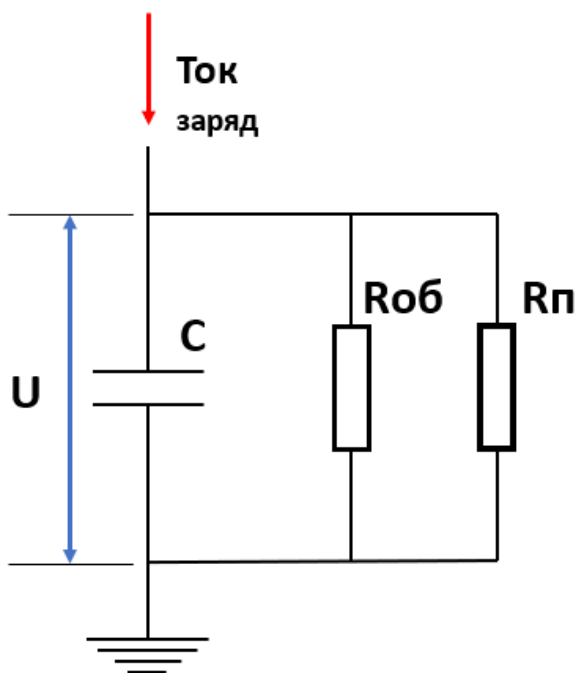


Рис. 5.6. Эквивалентная электрическая схема:

C – электрическая емкость человека, пФ; U – разность потенциалов, В; $R_{об}$ – сопротивление обуви, Ом; $R_{п}$ – сопротивление резистора на плате, Ом

Электрическая емкость пользователя в одежде составляет 100-200 пФ, электрическое сопротивление низа обуви $R_{об}$ – для повседневной обуви $R_{об} \geq 10^{10}$ Ом. Общее сопротивление электрической цепочки разряда емкости C на землю определяется из соотношения:

$$R = R_{об} * R_{п} * (R_{п} + R_{об})^{-1}; \quad (5.1)$$

Для антистатической обуви (R_{AC}) должно соблюдаться условие $R = R_{AC}$, тогда электрическое сопротивление резистора на плате $R_{п}$ определяется соотношением:

$$R_{п} = R_{AC} * R_{об} * (R_{об} - R_{AC})^{-1}; \quad (5.2)$$

При выполнении условия $R_{об} \geq R_{AC}$ сопротивление резистора на плате равно значению R_{AC} .

На рис. 5.7 представлен общий вид устройства антистатической обуви с заземляющими свойствами.



Рис. 5.7. Общий вид устройства антистатической обуви с заземляющими свойствами: 1 – электропроводный слой подошвы; 5 – задний наружный ремень; 8 – карман; 9 – кнопка; 11 – эластичный браслет, в состав которого входят токопроводящие нити

Техническая задача и технический результат достигаются тем, что антистатическая обувь с заземляющими свойствами (см. рис. 5.7) содержит в нижнем электропроводном слое подошвы 1 металлический контакт 2 в виде проводника, закрепленный между двумя слоями подошвы с помощью скобы 3 (рис. 5.8) [295].

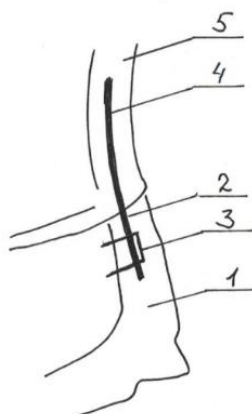


Рис. 5.8. Устройство металлического контакта: 1- электропроводный слой подошвы; 2 – металлический контакт; 3 – скоба; 4 – проводник; 5 – задний наружный ремень

Металлический контакт связан через проводник 4 внутри заднего наружного ремня 5 с платой 6 со сменным резистором 7 с постоянным электрическим сопротивлением в диапазоне от 10^5 до 10^8 Ом (рис. 5.9).

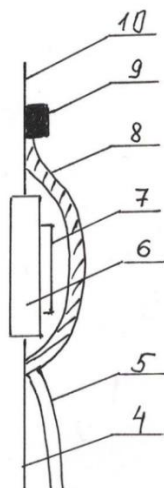


Рис. 5.9. Устройство платы со сменным резистором: 4 – проводник; 5 – задний наружный ремень; 6 – плата; 7 – сменный резистор; 8 – карман; 9 – кнопка; 10 – проводник

Резистор для варьирования электрического сопротивления выполнен в виде чипа из высоковольтных микрорезисторов, соединенных последовательно и изолированных от внешней среды посредством герметизирующего компаунда с высоким удельным сопротивлением. Плата 6 расположена внутри кармана 8 на кнопке 9, что позволяет произвести быструю замену резистора 7, для варьирования электрического сопротивления. Плата 6 связана через проводник 10 с токопроводящим эластичным браслетом 11, регулируемым на ноге лентой-велькро.

Электрическое сопротивление антистатической обуви находится в диапазоне от 10^5 до 10^9 Ом, поэтому возможность быстрой замены номинала резистора позволяет устанавливать его постоянным в заданном диапазоне, в зависимости от области использования. Рекомендуемое электрическое сопротивление 10^7 Ом делает возможным применение антистатической обуви с заземляющими свойствами в нефтегазоперерабатывающей отрасли и при работе с электроникой.

Устройство работает следующим образом: в процессе передвижения на пользователе накапливается электростатический заряд, образующийся заряд передается на токопроводящий эластичный браслет 11, скапливается там, и перетекает через проводник на плату 6 со сменным резистором 7 при постоянном электрическом сопротивлении в диапазоне от 10^5 до 10^8 Ом по проводнику 4 через

металлический контакт на нижний электропроводный слой подошвы 1. Через электропроводный слой подошвы, накопленный электростатический заряд стекает с пользователя на напольное покрытие (землю). Время стекания заряда зависит от сопротивления R и электрической емкости человека и равно:

$$\tau = R * C \quad (5.3)$$

Для повседневной обуви среднее время стекания заряда составляет секунды ($C = 200$ пФ; $R_{об} = 10^{10}$ Ом, $\tau = 2$ с). Для антистатической обуви, оснащенной описанным устройством, время стекания заряда можно варьировать в интервале $\tau = 2 \cdot 10^{-5} - 2 \cdot 10^{-2}$ с, не нарушая требования электробезопасности при работе на объектах с электрическими сетями.

Антистатическая обувь с заземляющими свойствами разработана таким образом, что накопленный в процессе передвижения заряд с тела человека передается на плату со сменным резистором с постоянным электрическим сопротивлением $R_{п}$ и далее стекает на напольное покрытие или землю. С помощью устройства можно задавать электрическое сопротивление в диапазоне от $1 \cdot 10^5$ Ом до $1 \cdot 10^9$ Ом, что обеспечивает нормированную проводимость для стекания заряда. Использование антистатической обуви способствует предотвращению аварий, которые происходят вследствие образования статического электричества на теле человека при работе в нефтегазоперерабатывающей отрасли, исключить или свести к минимуму вероятность выхода из строя чувствительных электронных систем и компонентов.

В перспективе для расширения внедрения «умных» СИЗ и снижения числа чрезвычайных происшествий на производстве возможно внедрение автоматизированной передачи информации об электростатическом потенциале, который накапливается на теле человека.

Заземлением тела человека через антистатическую обувь с заземляющими свойствами также нейтрализуются вредно влияющие на здоровье наведенные электростатические поля.

5.4. Совершенствование конструкций обуви по показателю антистатичности с использованием аддитивных технологий

Любое современное производство и обувная промышленность не исключение, невозможно без применения инновационных технологий [264, 265, 266, 271, 272, 284]. В связи с этим из числа приоритетных направлений развития цифровизации обрабатывающих отраслей российской промышленности для настоящей работы выделим:

- производство высокотехнологичной продукции, соответствующей индивидуальным требованиям потребителя, увеличение доли высокотехнологичной продукции, предоставляемой по сервисной модели «товар как услуга», повышение эффективности работы оборудования за счет внедрения новых решений для управления загрузкой фондов;
- снижение затрат предприятий на разработку и вывод продукции на рынок за счет использования технологий цифрового моделирования и цифровых (виртуальных) испытаний, разработки и применения цифровых (виртуальных) испытательных стендов, цифровых (испытательных) полигонов;
- внедрение технологий искусственного интеллекта в обрабатывающих отраслях промышленности;
- достижение «цифровой зрелости» обрабатывающих отраслей промышленности.

Широкое использование технологий 3D-печати [200, 204, 284, 386] объясняется доступностью метода; его пригодностью для мелкосерийного производства; малым количеством отходов; энергоэффективностью; экологичностью; возможностью автоматизации; высокой воспроизводимостью формы; непрерывностью производственных процессов; высокой степенью персонализации изделий, а также перспектива их проектирования в цифровом виде. Последнее играет решающую роль при изготовлении инклюзивной продукции обувного назначения, относящейся к технологически сложному штучному производству. Несмотря на привлекательность 3D-печати, возникает вопрос

обеспечения требуемого баланса между возможной структурной сложностью объекта проектирования, скоростью его изготовления и доступной для потребителя ценой [285]. Их решение во многом зависит от выбора метода 3D-печати, а также расходных материалов [286]. На данный момент доступен широкий спектр методов 3D-печати. Основные различия заключаются в способе нанесения слоев и используемом сырье [287]. Ряд технологий построен на размягчении или полном плавлении материалов для создания слоев. Сюда входит выборочное лазерное спекание (SLS); выборочная лазерная плавка (SLM; метод послойного наплавления (FDM или FFF); струйная трехмерная печать (PolyJet); цифровая светодиодная проекция (DLP); производство твердых изделий методом фото-полимеризации [369], известное как стереолитография (SLA); технология ламинирования листовых материалов (LOM), при которой тонкие слои материала подвергаются резке до необходимого контура с последующим соединением в единое целое и др. [288, 369]. Исходным сырьем для технологий 3D-печати может быть металл, полимеры, бумага, гипс и др. [289]. Остановимся подробно на тех методах 3D-печати, реализация которых предполагает использование полимерного сырья [290]. Из всех перечисленных методов 3D-печати наиболее коммерчески доступными, дешевыми и распространенными являются методы послойного наплавления (FDM или FFF) [291]. В качестве расходных материалов для FDM или FFF методов [281, 292] используют термопластичные полимеры, такие как тройной сополимер акрилонитрила с бутадиеном и стиролом (АБС пластик, англ. ABS), поликарбонат (ПК, англ. PC), полилактид (ПЛА, англ. PLA), полиэтилен низкого давления (ПЭНД, англ. HDPE), смеси поликарбоната и ABS-пластика, полифениленсульфон (ПФС, англ. PPSU) [369], термопластичный полиуретан (ТПУ, англ. TPU) [270] и др. Для выполнения задачи исследования настоящей работы наиболее подходящим являются АБС-пластики, так как они обладают антистатическими свойствами. АБС-пластик – конструкционный термопластичный продукт сополимеризации акрилонитрила, стирола и бутадиена [295]. Основные направления потребления акрилонитрилбутадиенстирола – приборостроение, автомобильная промышленность, радиотехника, медицинская техника, бытовая электротехника,

товары народного потребления [296]. Точность изготовления моделей из АБС-пластика достигает 50 микрон (0,05 мм). Химический состав наделяет его свойствами технологичности, ударопрочности, долговечности, окрашиваемости, влаго- и маслостойкостью, стойкостью к щелочам и кислотам, широким диапазоном эксплуатационных температур: от -40°C до $+90^{\circ}\text{C}$ (у модифицированных марок до $103-113^{\circ}\text{C}$) [369], хорошей формоустойчивостью, растворимостью в ацетоне, кетонах, эфирах (что позволяет не только склеивать детали из АБС, но и сглаживать с помощью растворителей неровности поверхности) [293]. Также популярность сополимера связана с его доступностью, не высокой себестоимостью (от 1500 до 3000 руб. за кг). Недостатки определяют довольно высокая температура печати, порядка $210-270^{\circ}\text{C}$, неустойчивость к ультрафиолетовому излучению, высокая термоусадка; запах при работе с филаментом и необходимость предварительного прогрева рабочего стола, примерно до 110°C , во избежание прилипания материала к его поверхности [294].

В настоящее время на рынке представлены АБС-пластики для 3D-печати компании U3Print [300]. Это российский бренд, который занимается созданием и производством специальных материалов для FDM-печати преимущественно инженерного направления. Марочный ассортимент АБС-пластиков компании U3Print представлен в табл. 5.2 [295].

Табл. 5.2. Марочный ассортимент пластиков компании U3Print [295]

Наименование показателя	Материал			
	U3 ABS M10	U3 ABS Dissipative	U3 ABS Flame Stop	U3 ABS Conductive 2M
	Высококачественный ABS + модификатор ударной вязкости	Компаунд на основе высококачественного ABS и электродиссипативного полимера	Компаунд на основе ABS с добавлением антипиренов	Компаунд на основе высококачественного ABS и углеродных нанотрубок CNT
1	2	3	4	5
Модуль упругости при растяжении, МПа	1401	—	888	1652

1	2	3	4	5
Прочность на разрыв, МПа	21.2	–	32,5	28,3
Прочность на растяжение, МПа	24	–	32,5	28,7
Рекомендуемая скорость печати, мм/с	20-40	20-40	25-50	20-40
Рекомендуемая температура подогреваемой площадки, °С	90	90	90	90
Рекомендуемая температура экструдера, °С	215-225	215-225	210-220	215-225
Сушка	нет	–	нет	нет
Твердость по Шору, D	64.5	–	76	73
Температура деформации, °С	116	100	100	103
Ударная вязкость, кДж/м ²	17,3	17,1	10,4	11,74
Удлинение при разрыве, %	5.24	–	3,92	2,54
Удлинение при растяжении, %	–	–	3,87	2,43
Усадка	средняя	средняя	средняя	достаточно низкая
Электрическое сопротивление, Ом	–	не выше 10 ⁹	–	10 ⁴
Варианты цветов	1	1	1	1

В табл. 5.3 представлено сравнение свойств АБС-пластиков компании U3Print по таким параметрам, как прочность, УФ-стойкость, термостойкость, электропроводность и т.п.

Табл. 5.3. Сравнительная таблица свойств ABS-пластиков производителя U3Print [301]

Наименование показателя	U3 ABS M10	U3 ABS Dissipative	U3 ABS Flame Stop	U3 ABS Conductive 2M
1	2	3	4	5
Прочность	*	*	*	*
Твердость	**	**	**	**
Хрупкость	**	**	**	**
Износостойкость	*	*	*	*
Термостойкость	**	**	**	**

1	2	3	4	5
Химстойкость	*	*	*	*
УФ-стойкость	*	*	*	*
Влагостойкость	**	**	**	**
Абразивность	—	—	—	—
Электропроводность	—	*	—	***

где *** – отлично, ** – хорошо, * – плохо, «—» – отсутствует.

Исходя из анализа технологических свойств и требований к материалам для изготовления подошв антистатической обуви, выявлена возможность использования кондуктивного пластика U3 ABS Conductive 2M от компании U3Print.

Для апробации концепции антистатической обуви с заземляющими свойствами [304] в качестве объекта исследования выбрана модель специальной обуви литьевого метода крепления. Верх модели изготовлен из гладкой натуральной кожи. Подкладка из текстиля с технологией, которая отводит испаряемую влагу и способствует улучшенному воздухообмену. Защитный подносок из композитного материала, ударной прочности 200 Дж для защиты от ударов в носочной части. Подошва трехслойная (ПУ/ТПУ/ТПУ), выполнена по технологии трехкомпонентного литья полиуретанов. Температурный режим эксплуатации подошвы от -35 °С до +60 °С. Модель оснащена противопрокольной стелькой из синтетического волокна высокой механической и термической стойкости – кевлара, у которого предел прочности на прокол 1200 Н [295]. Данная модель специальной обуви соответствует стандартам:

- ГОСТ 12.4.137-2001 «Обувь специальная с верхом из кожи для защиты от нефти, нефтепродуктов, кислот, щелочей, нетоксичной и взрывоопасной пыли. Технические условия» [28];
- ГОСТ 12.4.032-95 «Обувь специальная с кожаным верхом для защиты от действия повышенных температур. Технические условия» [35];
- ГОСТ 28507-90 «Обувь специальная кожаная для защиты от механических воздействий. Общие технические условия» [302];

- ГОСТ 12.4.033-95 «Обувь специальная с кожаным верхом для предотвращения скольжения по зажиренным поверхностям. Технические условия» [303];
- ГОСТ Р ЕН 20345-2011 «Средства индивидуальной защиты ног. Обувь защитная. Технические требования» [18].

Исследование антистатических характеристик модели обуви проводилось одним из практических методов – измерением электрического сопротивления прибором VKG A-770, который позволяет фиксировать сопротивления при тестовом напряжении 100 В - от 1 МОм до 999 ГОм. Приборная погрешность составляет 2,5% (диапазон 1 кОм – 10 ГОм), 5% (диапазон 10 ГОм – 100 ГОм) и 10% при диапазоне 100 ГОм – 999 ГОм. Методика измерения поверхностного сопротивления осуществлялась по системе «от точки до точки» с использованием тестовых электродов, которые подсоединялись к прибору с помощью соединительных кабелей. Далее электроды помещают на тестируемую поверхность на расстоянии друг от друга не менее 300 ± 10 мм. При участии в эксперименте человека один из электродов находился в его руке. Проведена серия экспериментов по 5 измерений в каждом, с вычислением средних арифметических значения. Измерения электрического сопротивления модели обуви без участия человека выполнялись на металлической пластине, при этом один электрод находился на поверхности пластины, а другой – внутри обуви (рис. 5.10, а) [295].

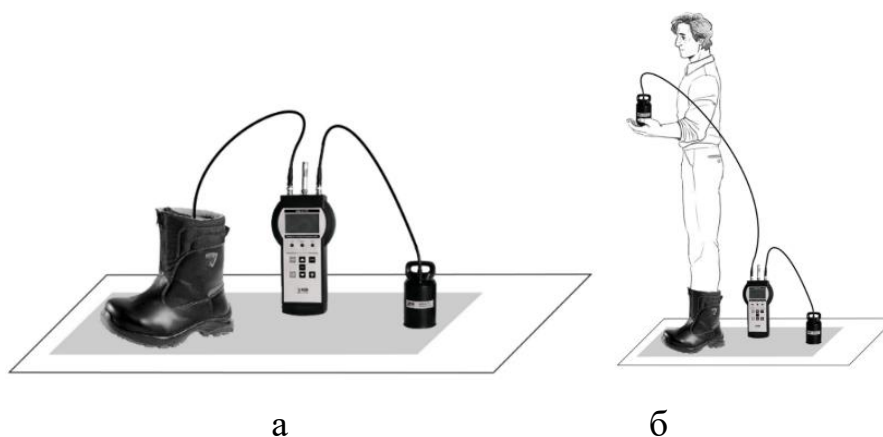


Рис. 5.10. Схема измерения электрического сопротивления; а – обувь, б – система «человек-обувь-напольное покрытие»

Электрическое сопротивление составило 44,80 ГОм. Далее проводилось измерение электрического сопротивления обуви на металлической пластине с участием человека (см. рис. 5.10, б), электрическое сопротивление - 3,10 ГОм [295].

Так как в качестве объекта выбрана модель специальной обуви, которая не обладает антистатическими свойствами, то она была доработана в соответствии с патентом на полезную модель № 204433 U1 «Антистатическая обувь с заземляющими свойствами» [304] (см. п.п. 5.3). Чтобы модель обуви имела антистатические свойства, нижний слой подошвы, контактирующий с поверхностью напольного покрытия, должен быть выполнен из токопроводящего материала. Проектирование токопроводящего элемента предполагает его моделирование. Для этого в программной среде КОМПАС-3D по 3D-модели подошвы спроектирована модель дополнительной вставки в подошву (рис. 5.11). На основе полученной модели на 3D-принтере напечатана и установлена в подошву вставка из токопроводящего пластика U3 ABS Conductive 2M [295].

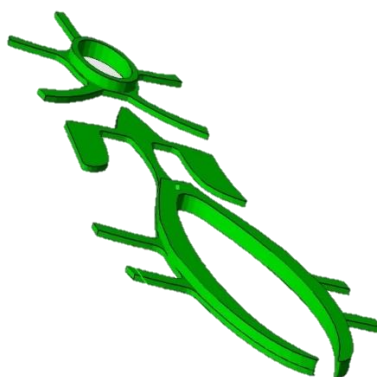


Рис. 5.11. 3D-модель вставки токопроводящего слоя

Токопроводящая связь между моделью обуви и вставкой обеспечивается стелькой, имеющей металлическую полосу в пяточной части и соединяющейся проводом токопроводящей вставки с резистором, с заданным сопротивлением. После доработки модели проведена оценка электрического сопротивления конструкции, в подошву которой помещена вставка из токопроводящего материала (рис. 5.12, а) без участия человека. Электрическое сопротивление составило 9,79 МОм. Исследованиями электрического сопротивления этой же конструкции, но с

участием человека (см. рис. 5.12, б) зафиксировано электрическое сопротивление - 10,30 МОм [295].

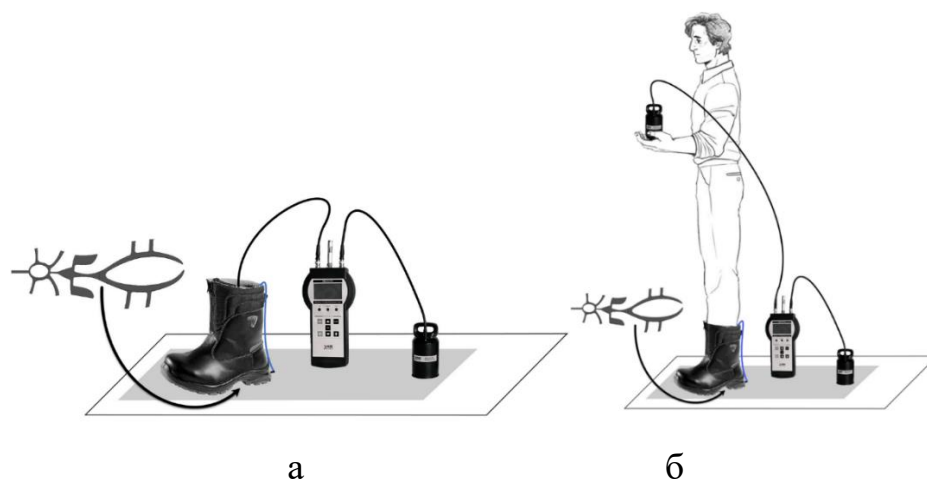


Рис. 5.12. Схема измерения электрического сопротивления: а – обувь со вставкой, б – система «человек-обувь/вставка-напольное покрытие»

Итоговые результаты измерений представлены на рис. 5.13. Очевидно, что электрическое сопротивление обуви без токопроводящей вставки находится в диапазоне 10^9 Ом и выше, а показатели модели обуви с токопроводящей вставкой – в диапазоне 10^6 - 10^7 Ом [295].

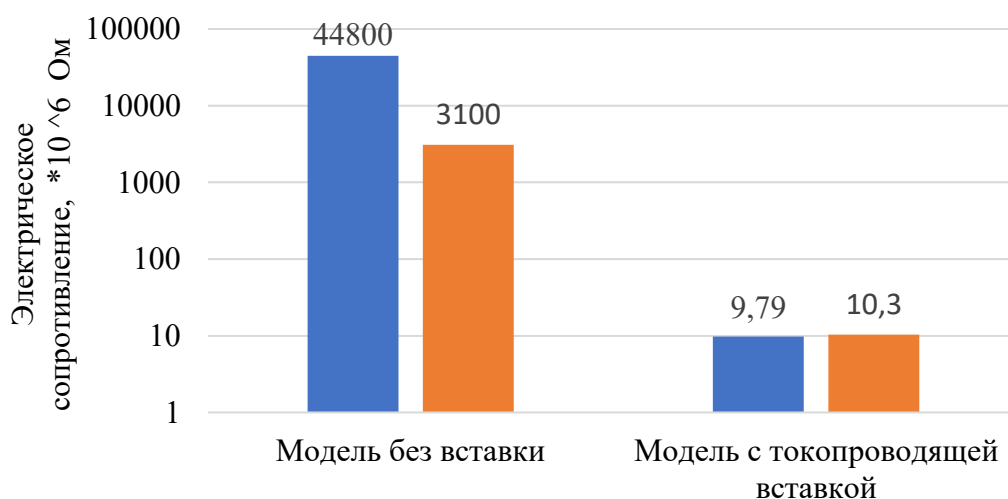


Рис. 5.13. Результаты измерений электрического сопротивления модели обуви и модели обуви с токопроводящей вставкой

Таким образом, испытания показали состоятельность запатентованной полезной модели № 204433 U1 «Антистатическая обувь с заземляющими

свойствами» [304]. Значения электрического сопротивления, полученные при измерении модели с токопроводящей вставкой, соответствуют сопротивлению антистатической обуви согласно техническими требованиям ГОСТ Р ЕН ИСО 20345-2011 [18], то есть находится в пределах $> 100 \text{ кОм} \leq 1000 \text{ МОм}$.

Из большого количества производителей АБС-пластика наиболее крупными являются [297]:

- Chi Mei Corporation, Formosa Plastics Group, Dow Inc., Grand Pacific на Тайване;
- LG Chem, BASF, Lanxess, Samsung Cheil Industries в Республике Корея;
- Techno Polymer в Японии;
- Dow Inc., Polimeri Europe, Ineos в Европе;
- ПАО «Нижекамскнефтехим», ОАО «Пластик» в России.

Производителям из Тайваня, Кореи и Японии принадлежит около 74 % мирового производства АБС-пластика.

АБС-пластики компании АО «Пластик» предназначены для производства широкого спектра изделий. Обладают высокой ударопрочностью, повышенными деформационными свойствами, теплостойкостью. Используются в корпусных деталях автомобильной промышленности, бытовой и электротехнике, а также в отрасли 3D-печати. Могут перерабатываться методом экструзии, литься под давлением, обладают антистатическими свойствами. Некоторые марки сочетают термо-, свето- и атмосферостойкость с повышенной текучестью. Отдельные виды марок могут использоваться в производстве товаров народного потребления, контактирующих с пищевыми продуктами при условии дополнительной сертификации конечных изделий. Компания выпускает ряд литьевых и экструзионных марок АБС-пластика [295]. Марочный ассортимент АБС-пластика компании АО «Пластик» содержится в таблице 5.4.

Табл. 5.4. Марочный ассортимент пластиков компании АО «Пластик» [298]

Наименование показателя	АБС 2020-31 (32)	АБС 2020-31М	АБС-2525-31(32)	АБС-1525-31(32)	АБС-1515-31(32)	АБС-1530-31(32)	АБС 2802-31	АБС-2806-31
Плотность, кг/м ³	1040	1040	1040	1040	1040	1040	1040	1040
Усадка при литье под давлением, % , в пределах	0,3-0,7	0,3-0,7	0,3-0,7	0,3-0,7	0,3-0,7	0,3-0,7	0,3-0,7	0,3-0,7
Показатель тягучести расплава, г/10 мин	9,0	14,0	20,0	22,0	19,0	25,0	2,5	6,0
Относительное удлинение при разрыве, %	30,0	25,0	25,0	20,0	20,0	20,0	35,0	32,0
Ударная вязкость по Изоду, кДж/м	32,0	25,0	22,0	16,0	19,0	16,0	42,0	40,0
Предел текучести при растяжении, кгс/см	460,0	450,0	450,0	470,0	470,0	470,0	400,0	440,0
Температура размягчения по Вика, С	100,0	97,0	96,0	101,0	102,0	98,0	100,0	100,0
Блеск, % (под углом 60 °)	-	-	90,0	90,0	92,0	92,0	-	-
Термо- и светостабилизированные марки	+	+	+	+	+	+	+	+
Марки, разрешенные к контакту с пищевыми продуктами	-	-	-	+	+	+	-	-

ПАО «Нижекамскнефтехим» выпускает продукцию в форме гранул, ассортимент производимого АБС-пластика подразделяется на литьевые и экструзионные марки (табл. 5.5) [299].

Табл. 5.5. Марочный ассортимент пластиков компании ПАО «Нижнекамскнефтехим»

Наименование показателя	АБС-пластик 3432	АБС-пластик 2332	АБС-пластик 1534	АБС-пластик 1035	АБС-пластик 0445E
Показатель текучести расплава, г/10мин, при 2200 С на 10 кг нагрузки, в пределах	33,0±5,0	23,0±3,0	15,0±3,0	10,0±1,5	4,0±1,5
Глянец под углом 20°, не менее	60	60	50	50	60
Массовая доля остаточного стирола, %, не более	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
Ударная вязкость по Изоду с надрезом (4,0 мм, +230 С) кДж/м ² , не менее	11	11	10	10	15
Температура размягчения по Вика, С, не ниже	95	90	100	98	100

Аддитивные технологии позволяют в короткий период смоделировать и поместить в нижний слой подошвы, контактирующей с поверхностью напольного покрытия, вставку, из токопроводящего материала, которая придает специальной обуви антистатические свойства.

5.5. Совершенствование технологий изготовления низа антистатической обуви и ее элементов с использованием инструментов 3D-прототипирования

3D-печать или 3D-прототипирование – один из современных методов позволяющих получить практически любой макет, смоделированный в 3D-среде. В обувной промышленности особое место отводится технологической оснастке, которая необходима на всех стадиях производства [278].

Одним из основных видов технологической оснастки являются пресс-формы. Разработка и изготовление пресс-форм новых изделий сложный и дорогостоящий процесс [305]. Его высокая стоимость в некоторых случаях становится определяющим фактором при решении вопроса о внедрении образца обуви в производство. Целесообразной является такая долговечность пресс-форм, которая позволяла бы изготовить только требуемое количество изделий. Более высокая

долговечность является излишней и затраты на приобретение таких пресс-форм экономически не оправданы.

Высокая стоимость изготовления пресс-форм, серьезные временные и трудозатраты на разработку и производство одного экземпляра вызывают необходимость таких технологий, которые допускают сочетание хороших качеств традиционных пресс-форм с эксплуатационными преимуществами, включая низкие производственные расходы, недефицитность материалов, простоту обработки за более короткий срок изготовления [279, 280].

Оборудование, наиболее пригодное для использования в обувной промышленности (табл. 5.6), должно отвечать ряду критериев, удовлетворение которых, способствует его эффективному использованию при изготовлении макетов обуви, деталей низа и оснастки:

- габариты рабочей площадки должны соответствовать мужской колодке для сапог 42 размера (285x90x90мм);

Табл. 5.6. Сравнительные характеристики 3D-принтеров технологии печати – FDM / FFF

Модель, фирма-производитель	Масса, кг	Рабочая зона, длина, ширина, высота, мм,	Материалы	Максимальная температура печати, °C	Толщина слоя, мм	Цена, тыс. руб.
1	2	3	4	5	6	7
Creality K1, Creality	13	220x220x250	ABS, PLA, PETG, PET, TPU, PA, ABS, ASA, PC, PLA-CF, PA-CF, PET-CF	300	0.1 - 0.35	60
Kobra Max, Anycubic	20	400x400x450	PLA, ABS, PETG, Wood, TPU	260	0.1 - 0.35	52
Picasso Designer XL, Picasso	75	360x360x610	ABS, PLA, HIPS, PET, PC, FLEX, PETG, CERAMO, SBS и другие	430	от 0.01	619

1	2	3	4	5	6	7
Hercules Strong DUO, Импринта	56	300x300x40 0	ABS, PLA, HIPS, Rubber, PC-ABS, PETG, Carbon, Nylon, POM, FLEX, Eternal, Wood, PVA, PP, SBS, ASA	280	0,015 – 0,9	400
Maestro Duet, Maestro	25	245x245x40 0	PLA, ABS, ABS-PC, SBS, HIPS, PETG, NYLON, FLEX, PC, PP, WAX3D, AEROTEX, CERAMO, KAUCHUCK, PVA	300	0,01 – 0,25	355
Guider 3 Ultra, FlashForge	70	330x330x60 0	PLA, PETG, ASA, ABS, PC, PA, PLA-CF, PETG-CF, PETG-GF, PA-CF, PA-GF и другие	350	0,05 – 0,4	470
F2 Quart, F2 innovations	150	600x600x60 0	ABS, PLA, PP, PETG, ASA, PC, ABS+CF, PEEK, PEKK, Ultem, PEEK+CF, PSU, PPS и т.д.	550	0,05 – 0,5	900

- пригодность используемого материала – характеризуется соотношением прочности, веса и цены получаемого макета. Наиболее подходящим материалом на сегодняшний день является АБС-пластик;

- линейные размеры оборудования – длина, ширина, высота и масса оборудования. При определении оптимальных габаритов учитывается отношение размера рабочей камеры к оборудованию в целом, чем оно ближе к единице, тем лучше используется производственная рабочая площадь;

- точность построенных моделей должна соответствовать реалистичной модели, изготовленной в экспериментальном цехе. При этом важно, чтобы точность модели не превышала визуально необходимую, так как это существенно влияет на скорость изготовления макета и стоимость оборудования. Нормой при

проектировании обуви считается погрешность в 0,5 миллиметра, следовательно, погрешность не более полу миллиметра можно считать допустимой;

- скорость изготовления моделей: чем данный показатель выше, тем более эффективна трехмерная печать, т.е. скорость должна быть максимально возможной;

- толщина слоя характеризует «гладкость» получаемой модели, и должна находиться в пределах 0,01 – 0,3 мм. Данный показатель напрямую связан с точностью изготовления модели в целом и скоростью изготовления макета. Толщина слоя при изготовлении макетов обуви должна быть не выше 0,2 мм.

Для изготовления макетов изделий и подошв наиболее приемлемым оборудованием является 3D-принтер компании Maestro. Он обладает оптимальной областью печати, недорогими расходными материалами, прост в обслуживании, поддерживает различные форматы файлов 3D, при приемлемой цене.

Для реализации задачи по разработке метода проектирования и изготовления экспресс-форм, выявлению подходящих технологий и материалов для 3D-печати и производства изделий из кожи нами спроектировано и изготовлено (напечатано на 3D-принтере) две пресс-формы.

Одна пресс-форма изготовлена из PLA-пластика с техническими характеристиками: температура экструзии: 190 – 230 °С; температура платформы: 0 – 60 °С; минимальная толщина стенок - 1 мм; малая усадки при изготовлении изделий; высокая жесткость [305, 306].

Другая пресс-форма изготовлена из термоустойчивого пластика PC/ABS Bestfilament с техническими характеристиками: температура платформы 3D-принтера – 110 °С; минимальная толщина стенок - 1 мм; выдерживает кратковременный нагрев до +153 °С; диапазон температур длительной эксплуатации – 100-130 °С; высокая ударопрочность при низких температурах; малая усадка при изготовлении изделий; высокая жесткость.

Апробация показала, что спроектированные пресс-формы имеют недостатки, которые сводятся к следующему:

- недостаточно гладкая внутренняя поверхность затрудняет изъятие готового изделия, так как при печати на 3D-принтере по технологии послойного наплавления с одной стороны изделия образуются едва заметные выступающие полосы;
- в конструкциях без выходных отверстий на поверхности полиуретана образуются небольшие пузырьки воздуха.

Кроме того, пресс-форма, напечатанная из PLA-пластика, нагрелась значительно меньше, чем пресс-форма из термоустойчивого пластика PC/ABS Bestfilament.

В соответствии с выявленными недостатками нами разработана и напечатана ещё одна пресс-форма (рис. 5.14, а, б).

Пресс-формы, созданные с помощью 3D-принтера, возможно будут менее долговечны, чем алюминиевые, но при этом значительно меньшей стоимости они привлекательны для мелкосерийного производства и быстрого изготовления экспериментальной партии продукции.

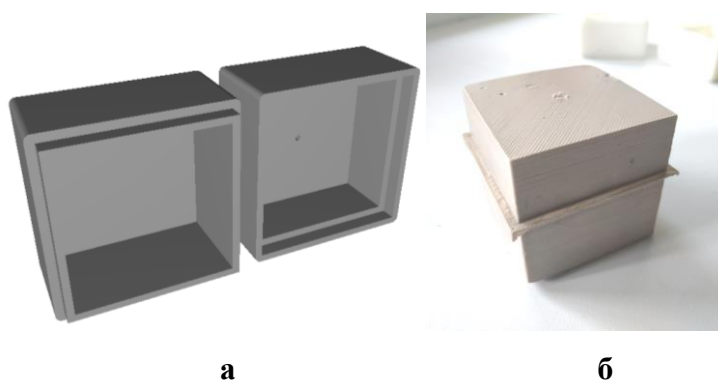


Рис. 5.14. Спроектированная и напечатанная пресс-формы (а); отлитое изделие (б)

Вышеизложенное позволило нам разработать методику проектирования и изготовления технологической оснастки для производства формованных подошв с использованием 3D-моделирования и 3D-печати [307].

Методика укрупнённо разделена на три этапа:

1. разработка 3D-модели подошвы для последующего проектирования экспресс-формы;

2. проектирование 3D-модели экспресс-формы;
3. изготовление экспресс-формы.

Для дальнейшей работы необходимо ввести понятие «экспресс-форма». Экспресс-форма – вид технологической оснастки, предназначенный для получения изделий различной конфигурации из полимерных материалов под действием давления, создаваемого на литьевых агрегатах. Отличительным признаком такой экспресс-формы является быстрое изготовление при помощи 3D-печати и высокая экономическая эффективность.

Традиционными материалами для изготовления пресс-форм являются алюминиевые сплавы, для которых характерна высокая удельная прочность, сочетающаяся с низкой плотностью. Благодаря этим особенностям возможно изготовление (отлив) деталей различной конфигурации без появления трещин.

Реализация технологии 3D-печати предполагает использование пластика, которые в отличие от алюминия имеют более низкую температуру плавления (190-280 °С против 500 °С). В связи с этим проведена апробация технического решения – по аналогу эталонной алюминиевой пресс-формы изготовлена пробная экспресс-форма методом 3D-печати. Для изготовления формальной модели экспресс-формы все размеры эталонной пресс-формы (рис. 5.15) из алюминиевого сплава АК6МЗЦ перенесены в систему трехмерного моделирования КОМПАС-3D (рис. 5.16).



Рис. 5.15. Общий вид эталонной алюминиевой пресс-формы из сплава АК6МЗЦ

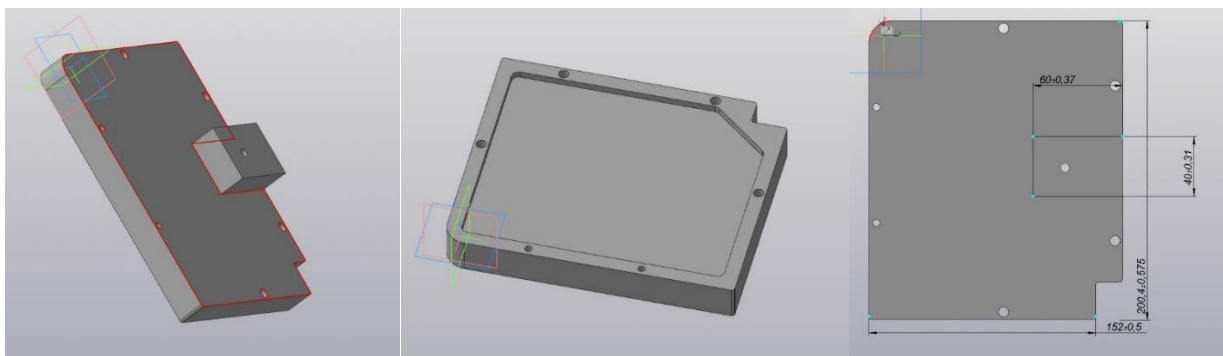


Рис. 5.16. Проекция формальной модели экспресс-формы в программе Компас-3D

На 3D-принтере по технологии FDM-печати изготовлена модель экспресс-формы (рис. 5.17) из пластика PLA+ фирмы ESUN, который является биоразлагаемым, биосовместимым, термопластичным, алифатическим полиэфиром и имеет хорошие физико-механические показатели. Следует отметить, что в процессе апробации в связи с недостаточной жёсткостью пластика увеличена толщина внешних стенок экспресс-формы относительно эталонной алюминиевой, а усиление ребрами жесткости дало возможность провести заливку полиуретановой массы в экспресс-форму без ее деформирования.

Перед заливкой ПУ-смеси, внутреннюю поверхность экспресс-формы и эталонной алюминиевой пресс-формы из распылителя обработали силиконовым каучуком. Далее на литьевом агрегате в формы впрыскивали ПУ-смесь.

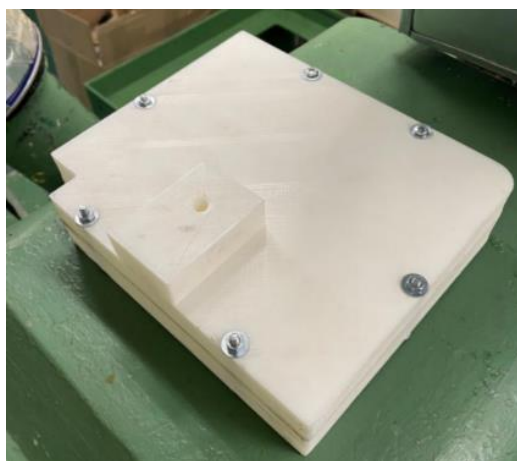


Рис. 5.17. Изготовленная на 3D-принтере экспресс-форма из пластика PLA+

После остывания залитого материала измерили линейные параметры полученных экспериментальных отливок (рис. 5.18, табл. 5.7).



Рис. 5.18. Внешний вид экспериментальной отливки, полученной в экспресс-форме

Анализ данных табл. 5.7 позволяет оценить погрешности размеров изделия из экспресс-формы по отношению к изделию из эталонной пресс-формы.

Табл. 5.7 Результаты измерений линейных параметров отформованных изделий и их погрешности относительно эталонной пресс-формы

Габариты	Параметры, мм		Погрешность, %	Параметры, мм		Погрешность, %
	внутренней полости эталонной пресс-формы	изделия из эталонной пресс-формы		внутренней полости экспресс-формы	изделия из экспресс-формы	
Высота	180,0	179,0	0,55	180,0	176,0	2,0
Ширина	150,0	150,0	0	150,0	146,0	3,0
Толщина	6,0	6,0	0	6,0	6,0	0

По параметру «высота» изделие из эталонной пресс-формы имеет незначительное отклонение от размера (0,5 %), что свидетельствует о высоком качестве изготовления. В то же время изделие из экспресс-формы имеет более заметное отклонение (2 %), что может указывать на недостаточную точность экспресс-формы.

По параметру «ширина» изделие из эталонной пресс-формы идеально соответствует эталонному размеру, а изделие из экспресс-формы имеет

погрешность в 3 %, что может быть критичным для изделий, где точные размеры имеют большое значение.

По параметру «толщина» как в изделии из эталонной, так и из экспресс-формы, размеры полностью соответствуют эталонному значению, что свидетельствует о стабильности процесса при формировании толщины.

Таким образом, изделия, отформованные в эталонной пресс-форме, превосходят по качеству изделия из экспресс-формы. Экспресс-форма демонстрирует ощутимые отклонения по высоте и ширине (в пределах 3 %), что говорит о необходимости учитывать больший процент усадки ее материала по сравнению с алюминиевой пресс-формой.

При впрыскивании полиуретановой массы в месте примыкания сопла к литниковой втулке произошла небольшая деформация наружной и внутренней поверхностей формальной модели экспресс-формы, что обусловлено высоким усилием прижатия литьевой головки агрегата к экспресс-форме и большой разницей температур в точке их контакта.

Результаты исследований, которые охватывают широкий спектр антистатических свойств материалов и обуви, полученных с применением различных методик и инструментов измерения, можно трансформировать в базу данных антистатических свойств обуви. Рассмотрим ее в следующем разделе.

5.6. Разработка интегрированной базы данных антистатических свойств обуви

В процессе разработки базы данных по результатам исследований [408], широкого спектра антистатических свойств материалов и обуви с применением различных методик и инструментов измерения, нами в программе Microsoft Excel – разработан ее прототип. Он включает блоки с информацией об электростатических, физико-механических и эксплуатационных характеристиках ключевых объектов исследования [379], в числе которых:

- материалы верха и низа обуви;

- типы обуви;
- элементы конструкции обуви;
- система «обувь-человек -напольное покрытие».

Каждый информационный блок содержит экспериментальные данные, включающие показатели: напряженности электростатического поля (E , кВ/м); электрического сопротивления (R , Ом); постоянной времени релаксации электростатического заряда (τ , с), а также сопутствующие параметры окружающей среды – влажность и температуру воздуха, существенно влияющие на электростатические характеристики материалов. Результаты измерений напряженности ЭСП получены как для отдельных материалов, так и для их пакетов в различных условиях эксплуатации. Особое внимание уделено взаимосвязи между показателями системы «обувь-человек -напольное покрытие», что позволяет более полно оценить антистатические свойства обуви в реальных условиях использования.

Второй этап работы включает интеграцию накопленных данных в среду 1С:Предприятие, которая позволяет автоматизировать бизнес-процессы и улучшить управление ресурсами компании. Выбор именно этой платформы обусловлен необходимостью создания эффективной системы работы с накопленными экспериментальными данными. Хотя Excel предоставляет базовые возможности для структурирования информации, включая формулы и связи между ячейками, вместе с тем для создания полноценной информационной системы этот инструмент имеет существенные ограничения. В частности, затруднена организация многоуровневых справочников и настройка связей между различными блоками информации, отсутствует возможность разработки специализированного интерфейса для работы с данными, существуют ограничения по организации многопользовательского доступа к информации. При увеличении объема обрабатываемых данных эффективность работы с таблицами существенно снижается. Платформа 1С: Предприятие предоставляет комплексные инструменты для разработки информационной системы, учитывающей специфику проектирования специальной обуви. Реализованная структура обеспечивает не

только надежное хранение информации, но и возможность организации удобного доступа через специализированный интерфейс. Важным преимуществом стала возможность создания форм ввода и анализа данных, ориентированных на работу технологов и конструкторов обуви. Система позволяет эффективно работать с растущим объемом информации, обеспечивая быстрый доступ к необходимым данным и их обработку.

Реализован механизм двустороннего обмена данными между Excel и 1С [408], что позволяет гибко работать с информацией в обеих средах. При импорте данных используется разработанный алгоритм сопоставления полей таблиц Excel со структурой справочников 1С, обеспечивающий корректное преобразование форматов данных и сохранение целостности информации. При этом таблицы Excel с экспериментальными данными сохраняют исходную структуру и объем информации. В 1С созданы соответствующие справочники, обеспечивающие структурированное по материалам, моделям обуви и другим объектам хранение информации. В базу данных интегрирована система работы с изображениями материалов, поддерживающая различные форматы файлов (включая GIF). Реализованы функции ручной настройки масштабирования превью и пакетной загрузки изображений, что позволяет оперативно наполнять базу данных визуальными материалами. Изображения на рис. 5.19 демонстрируют наглядность представления информации при работе с каталогом.

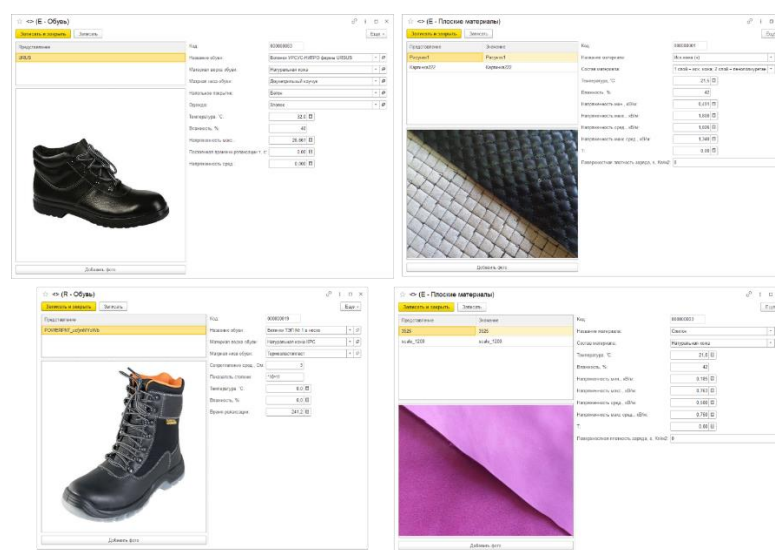


Рис. 5.19. Превью-изображения материалов

Реализован автоматический расчет некоторых электростатических характеристик материалов, таких как поверхностной плотности заряда (σ , Кл/м²) и входной ток ($I_{вх}$, А) на основе данных о напряженности ЭСП [408].

Настройка системы автоматического пересчета связанных значений при изменении исходных параметров позволяет оперативно получать актуальные данные об электростатических характеристиках материалов, что существенно упрощает процесс анализа свойств материалов, так как при внесении новых экспериментальных данных о напряженности ЭСП система автоматически производит необходимые вычисления и обновляет связанные показатели (рис. 5.20).

Параметр	Значение (Левая панель)	Значение (Правая панель)
Код	000000065	000000065
Название материала	БТ декорированный краской на основе ПВА	БТ декорированный краской на основе ПВА
Состав материала	Шерсть нат. тонкая 60%, полутонкая 15%, ов	Шерсть нат. тонкая 60%, полутонкая 15%, ов
Температура, °C	0,0	0,0
Влажность, %	32	32
Напряженность мин., кВ/м	2,870	2,870
Напряженность макс., кВ/м	4,880	4,880
Напряженность сред., кВ/м	1,880	3,000
Напряженность макс сред., кВ/м	0,000	0,000
T	20,10	20,10
Поверхностная плотность заряда, с, Кл/м ²	0,0000000000431	0,0000000000531

Рис. 5.20. Автоматический расчет электростатических характеристик материалов

Разрабатывается система отчетности для получения обобщенных данных в удобном для анализа формате. Такой функционал позволит эффективно обрабатывать накопленную информацию и представлять результаты исследований в структурированном виде. В отчетах собираются данные о выбранных материалах верха, подкладочных материалах, подошвы и других элементов конструкции, что позволяет оценить совокупные характеристики проектируемой модели обуви на основе данных об отдельных компонентах. При этом все необходимые данные об исследуемых объектах представляются в едином информационном пространстве, что упрощает процесс принятия решений при выборе материалов для различных конструктивных элементов обуви с учетом их влияния на общие электростатические показатели изделия (рис. 5.21).

[illegible]

Рис. 5.21. Форма отчета для анализа электростатических характеристик материалов и конструкций обуви

Структурирование данных в единой информационной системе позволит в дальнейшем прогнозировать накопление электростатических зарядов для типовых конструкций обуви, изготовленных из различных материалов. Такой подход обеспечивает возможность обоснованного выбора материалов при проектировании антистатической обуви с учетом конкретных условий эксплуатации.

Интеграция программы 1С с системами производства обуславливает бесперебойное внедрение новых материалов и конструкций в технологические процессы, своевременное обновление данных и поддержку актуальности информации. Особое внимание уделяется разработке системы контроля соответствия характеристик обуви заданным требованиям путем фильтрации по установленным параметрам. В интерфейсе предусмотрена настройка условий фильтрации по различным характеристикам, в том числе по нескольким параметрам одновременно: температурный режим, постоянная времени релаксации, электрическое сопротивление и другие показатели. Реализованные инструменты фильтрации работают не только с числовыми параметрами, но и позволяют производить отбор по текстовым характеристикам и диапазонам значений. Пользователь может сохранять часто используемые наборы условий фильтрации для последующего быстрого применения. Это позволяет оперативно находить материалы, соответствующие требуемым условиям эксплуатации и заданным характеристикам электростатической безопасности (рис. 5.22).

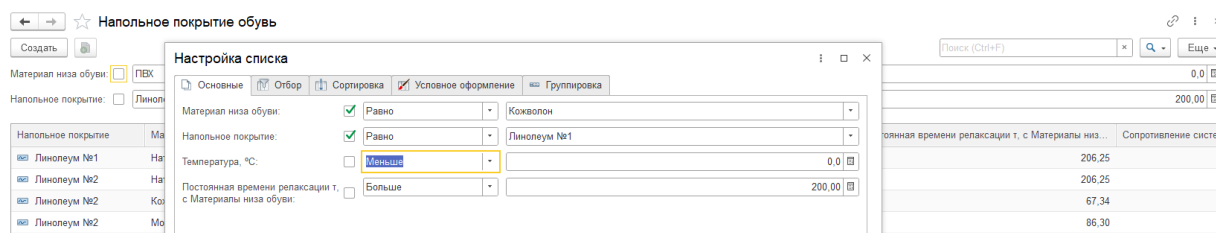


Рис. 5.22. Настройка параметров фильтрации данных

Наполнение базы данных продолжается, ведется работа по расширению функционала системы и загрузке её актуальными результатами исследований электростатических свойств материалов и конструкций обуви. Планируется внедрение современных методов анализа данных, включая возможности машинного обучения для прогнозирования характеристик новых комбинаций материалов на основе накопленного массива экспериментальных результатов. Особое внимание уделяется обеспечению удобства работы с системой для конечных пользователей – технологов и конструкторов обуви. Система имеет значительный потенциал для дальнейшего развития в направлении автоматизации процессов проектирования и оптимизации выбора материалов с учетом специфических требований производства.

В современных производственных условиях антистатическая обувь занимает важное место, обеспечивая безопасность работников и снижая риски, связанные со статическим электричеством в потенциально опасных средах. Постоянное совершенствование технологий и материалов, применяемых для изготовления такой обуви, требует разработки обширной базы знаний, которая будет служить основой для повышения ее эффективности и безопасности специальной обуви.

Система, основанная на данных о характеристиках материалов, конструкциях обуви и взаимодействии с окружающей средой, способствует не только улучшению процессов выбора и проектирования антистатической обуви, но и автоматизации обработки информации. Интеграция с программой 1С:Предприятие позволяет эффективно управлять ресурсами и получать данные для прогноза и контроля свойств антистатической обуви.

Перспективы дальнейшей работы по развитию базы данных включают

расширение функциональных возможностей и актуализацию информации о материалах и технологиях. Это создаст предпосылки для формирования конкурентного преимущества для производителей, способствуя внедрению инноваций и соблюдению современных стандартов безопасности. Постоянное совершенствование данной системы и адаптация к новым требованиям рынка позволит не только обеспечить надежность, но и устойчивое развитие обувной промышленности.

Таким образом, предлагаемый комплексный подход к созданию базы знаний об антистатической обуви является не только состоятельным, но и несет в себе значительный потенциал для улучшения условий труда и повышения безопасности на производственных предприятиях.

5.7 Стадии жизненного цикла разработки инновационной конструкции антистатической обуви

В последние десятилетия наука активно занимается исследованием проблематики инновационных товаров, на основе которых происходит формирование современной экономики. Во множестве научных исследований [425, 426, 427] доказано существование фактора цикличности экономики ввиду ее подверженности изменениям экономической конъюнктуры. За научным признанием цикличности последовало появление концепции жизненного цикла экономических явлений и процессов, среди которых принципиальную значимость получила концепция жизненного цикла инновационных товаров [347].

Обувь, как и любой другой товар, в данном случае инновационная антистатическая обувь, также имеет свой жизненный цикл, который можно рассматривать через призму экономических и маркетинговых концепций. В общем жизненный цикл обуви включает несколько стадий, то есть частей, выделяемых по признакам характерных для неё явлений, процессов и конечных результатов.

Проведенный в рамках настоящей диссертации комплекс исследований попытаемся представить по стадиям жизненного цикла, основными из которых для

нас предположительно являются научные исследования, проектирование, производство, вывод на рынок, эксплуатация, утилизация и могут включать по несколько этапов.

Прикладные исследования и опытно-конструкторские разработки являются критически важными для внедрения антистатической обуви на рынок. Они представляются основополагающими в обеспечении соответствия конечного продукта требованиям безопасности, функциональности и комфорта, необходимым в различных рабочих условиях.

На стадии прикладных научно-технических работ неизбежны систематические исследования, направленные на изучение свойств материалов, характеристик их электростатической проводимости, а также оценка влияния антистатической обуви на деятельность персонала в сложных производственных условиях. Эти исследования предполагают анализ существующих данных, экспериментальные исследования и оценку требований стандартов безопасности. Основная цель – получение четкого понимания, как различные материалы и конструкции обуви могут эффективно защитить работников от статических разрядов и связанных с ними рисков.

После прикладных исследований начинается стадия опытно-конструкторских разработок. На этом этапе создаются прототипы антистатической обуви, испытания которых помогут выявить возможные недостатки и совершенствования. Генерируются модели, которые соответствуют не только техническим требованиям, но и обеспечивают комфорт при длительной эксплуатации. Параллельно с этим могут проводиться экспериментальные испытания обуви различными группами пользователей для получения отзывов, способствующих совершенствованию конструкции и/или дизайна обуви.

Нам представляется, что стадии жизненного цикла разработок инновационной конструкции антистатической обуви должны включать: предпроектный анализ, «сервейинг» и формирование инноваций, разработку концепции, реализацию и внедрение в производство. На каждой стадии выполняются ключевые этапы, результаты которых призваны обеспечить

успешность продукта. Раскроем их содержание.

На первом этапе акцентируется внимание на анализе потребностей рынка: выявляются требования к безопасности и спецификациям, проводится оценка текущих стандартов и документации, а также исследование электростатических свойств материалов, используемых в производстве обуви. Это критически важно для понимания рыночной среды и ее требований.

На следующем этапе разрабатываются зависимости и модели для оценки свойств антистатической обуви, алгоритмы реализации расчетов, которые помогут определить ЭСБ и эффективность конструкции. На третьем этапе, которое включает детальное моделирование и выбор материалов для обуви, существенным является динамическое моделирование. Оно позволяет предсказать поведение материалов под воздействием различных факторов, что в значительной мере определяет последующее проектирование. Четвертый этап, реализующий инновационную конструкцию обуви, предполагает новые гибкие решения, отвечающие особенностям условий эксплуатации. Разрабатывается предварительная конструкторско-технологическая документация, изготавливаются варианты прототипов. На пятом этапе прототипы обуви тестируются, т.е., по сути, предложенные идеи проходят практическую проверку показателю электрического сопротивления, который напрямую влияет на безопасность продукта. Корректируется и создается конструкторско-технологическая документация.

Завершается процесс подготовкой к массовому производству, где рассматриваются технические аспекты и изготавливаются пробные партии. Это важно для окончательной проверки качества изделия и его соответствия заявленным характеристикам.

Таким образом, изложенное выше, можно привести к виду схемы, изображенной на рис. 5.23.



Рис. 5.23. Стадии жизненного цикла разработки инновационной конструкции антистатической обуви

Из схемы следует, что успешность антистатической обуви на рынке во многом определяется предварительными этапами прикладных исследований и опытно-конструкторских разработок, поскольку именно они являются ключевыми для создания качественного и безопасного продукта.

Предложенная схема показывает и визуализирует роль и место предложенных в диссертации разработок в контексте комплексного подхода к разработке инновационной конструкции антистатической обуви и может быть использована при принятии организационно-управленческих решений в проектной и процессной деятельности на предприятиях и в организациях, занимающихся производством специальной обуви. Таким образом, предложенная схема становится не только теоретическим обоснованием разработок, но и практическим инструментом, который может быть легко адаптирован для применения в реальных условиях, что значительно повысит эффективность и результативность управленческих действий в организациях.

ВЫВОДЫ ПО ПЯТОЙ ГЛАВЕ

1. Выявлено, что необходимость соблюдения стандартов безопасности, улучшение условий труда, использование современных технологий и материалов являются ключевыми аспектами для обеспечения здоровья и безопасности работников на нефтегазовых предприятиях, условия труда на которых представляют собой сложную комбинацию климатических и производственных факторов.

2. Подтверждены антистатические свойства специальной обуви с разработанными антистатическими насадками. Выявлено прямое влияние климатических условий, при температуре ниже -10°C и сухого снега, который сам по себе является изолятором. Обувь с заземляющими элементами не показывает улучшения показателя электрического сопротивления по сравнению с обувью без заземляющих элементов. Испытания показали, что загрязнение обуви (глина, снег) может значительно ухудшить ее антистатические свойства, что подчеркивает необходимость разработок, обеспечивающих устойчивость к загрязнению материалов и конструкций обуви.

3. Разработана концепция антистатической обуви с заземляющими свойствами для повышения безопасности и эффективности работы в нефтегазоперерабатывающей отрасли и других чувствительных к статическому электричеству областях. Технологическое решение обуви позволяет изменять электрическое сопротивление в зависимости от условий эксплуатации.

4. Спроектирован и реализован с помощью аддитивных технологий токопроводящий элемент в подошву обуви. Испытания показали, что обувь с токопроводящей вставкой из U3 ABS Conductive 2M пластика соответствует стандартам ГОСТ Р ЕН ИСО 20345-2011 2011 [18], демонстрируя электрическое сопротивление в диапазоне от 10^6 до 10^7 Ом. Обувь без токопроводящей вставки показала сопротивление в диапазоне более 10^9 Ом. Результаты подтверждают соответствие антистатической обуви нормативным требованиям и позволяют утверждать о состоятельности разработанной модели для эксплуатации в реальных

условиях, открывая новые возможности для совершенствования техники безопасности, повышения эффективности производства и персонализации изделий с использованием аддитивных технологий.

5. Разработана методика проектирования и изготовления экспресс-форм, включающая три этапа: создание 3D-модели подошвы, проектирование 3D-модели эксцесс-формы и ее изготовление. Методика позволяет быстро и эффективно создавать технологическую оснастку для производства формованных подошв. Определение понятия «экспресс-форма» и ее ключевых характеристик (быстрое изготовление с помощью 3D-печати, высокая экономическая эффективность) является важным шагом для продвижения новых технологий в обувной промышленности.

6. Разработана открытая интегрированная база данных антистатических свойств обуви, позволяющая прогнозировать характеристики новых комбинаций материалов на основе накапливаемого массива экспериментальных данных.

7. Разработаны стадии жизненного цикла создания научно-обоснованной инновационной конструкции антистатической обуви, которая включает несколько этапов: от предпроектного анализа и разработки прототипов до их тестирования и подготовки к массовому производству. Результаты систематических научно-технических исследований обеспечивают создание продукта, который отвечает требованиям безопасности и комфорта для пользователей в сложных производственных условиях. Проведенный комплекс работ и предложенные на его основе решения составляют прочный фундамент для успешной коммерциализации антистатической обуви.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Решена комплексная задача, заключающаяся в изучении и систематизации информации о влиянии статического электричества на технологические процессы и производственный персонал, проведении анализа актуальной нормативной документации, регулирующей уровни электростатических полей, а также осуществлении процессов проектирования и сертификации специальной обуви, включая антистатическую.

2. Проанализирован современный рынок антистатической обуви, охватывающий ассортимент и свойства продукции, ее конструктивные варианты, функциональные и эксплуатационные характеристики. Представлена экспертная оценка рынка рабочей обуви в различных отраслях, позволяющая определять критерии ее выбора в зависимости от условий эксплуатации.

3. Разработана классификация диапазонов электрического сопротивления обуви на основе анализа действующих стандартов и регламентов, определяющих уровень антистатических характеристик материалов. Выявлено, что отсутствие единой системы в оценке антистатических характеристик обуви затрудняет их сравнение и интерпретацию. Разнообразие подходов к измерению электрического сопротивления и, как следствие, различия в значениях показателей, нормируемых стандартами, приводит к коллизиям в области обеспечения безопасности и вызывают необходимость гармонизации нормативной документации на основе повышения эффективности оценки антистатических свойств.

4. Предложена классификация типовых конструкций специальной обуви по отраслям производств на основе анализа требований и принятых норм ее выдачи, которая рационализирует информацию об изделиях и может быть использована при их закупке работникам сквозных профессий. Выделены детали обобщенной конструкции специальной обуви, обеспечивающей различные уровни защитных свойств, которая может служить основой для разработки базы данных как материалов, так и «архитектоники» изделий, что отвечает современным задачам цифровизации производства.

5. Разработан динамический метод (патент на изобретение № 2307366) и методика измерения электростатических свойств обувных материалов, которые позволяют экспериментально оценивать накопление и релаксацию электростатического заряда. Метод допускает в процессе трибоэлектризации непрерывное накопление на поверхности испытуемого материала электростатического заряда, регистрацию динамики изменения однородного ЭСП.

6. Реализован метод исследования электростатических свойств материалов в широком диапазоне температур с использованием камеры на основе элементов Пельтье и камертонного датчика ЭСП. Выявлено, что закономерности изменений трибоэлектрических свойств образцов в различных климатических условиях подчиняются закону Аррениуса. Установленные взаимосвязи между указанными процессами могут служить основой для углубленного изучения механизмов трибоэлектрических свойств и их практического применения при создании новых материалов с заданными антистатическими свойствами.

7. Разработан автоматизированный экспресс-метод измерения времени релаксации электростатического заряда для оценки трибоэлектрических свойств материалов с погрешностью 15-20 %. Метод можно рекомендовать для верификации составов тканей.

8. Предложена и реализована методика измерения удельного объемного и поверхностного сопротивления обувных материалов. Установлены корреляционные зависимости антистатических показателей материалов для производства специальной обуви, которые демонстрируют связь оценки ЭСБ с химическим составом используемых материалов.

9. Разработан алгоритм расчетной оценки ЭСБ, основанный на математических моделях, который позволяет формулировать обоснованные рекомендации по снижению электростатического риска, включая изменения в проектировании обуви, параметров окружающей и предметно-пространственной среды рабочего. Алгоритм составляет основу математической модели электризации в системе «человек - обувь - напольное покрытие», которая демонстрирует взаимосвязи уровня накопления электростатических зарядов на

теле человека от электрического потенциала, наличия обуви и одежды различной диэлектрической проницаемости.

10. Предложена компьютерная модель протекания потока электрических зарядов сквозь диэлектрический материал. Установлена перколяционная граница вероятности пробоя в зависимости от потенциала внешнего электростатического поля. Разработанная модель макроскопически неоднородной среды показывает, что создание участков с различной местной проводимостью может быть реализовано при повышении устойчивости материалов к электрическим разрядам.

11. Реализованы метод и алгоритм методики оценки антистатических показателей системы «обувь – человек – напольное покрытие» с использованием индикатора-регистратора ИРИ-04М, который в реальных условиях эксплуатации позволяет анализировать уровни ЭСП и их влияние на безопасность и комфорт человека в процессе его взаимодействия с предметно-пространственной средой; оценить риски, связанные с электризацией, а на основе накопленной статистики предусматривать потенциально опасные ситуации искрообразования. В перспективе метод может быть адаптирован и усовершенствован с использованием таких современных технологий, как IoT-устройства и система больших данных. Это позволит аккумулировать информацию в режиме реального времени и проводить ее более глубокий анализ, результаты которого имеют большое прикладное значение не только для управления рисками, но и оптимизации процессов производства.

12. Построена математическая модель на основе универсального метода адаптивного случайного поиска, которая позволяет эффективно исследовать динамику накопления и стекания заряда при движении человека, а также автоматически определять границу между ключевыми этапами эксперимента. Проведен корреляционный и спектральный анализы динамики накопления заряда. Исследованиями автокорреляционных функций и спектральной плотности дисперсии практически на всех спектрах выявлены пики на низких и высоких частотах. Проведена оценка скорости стекания заряда с использованием регрессионных моделей. Показано, что убывание электростатического потенциала

подчиняется экспоненциальному закону. Полученные закономерности позволили построить математическую модель динамики накопления заряда на поверхности человека при его движении.

13. На основе проведенного моделирования разработана методика «накопления-стекания» электростатических зарядов в системе «обувь – человек – окружающая среда», которая позволяет не только минимизировать количество необходимых для исследования натурных опытов, но и глубже понять физику процессов трибоэлектричества и токов утечки. Модель отображает зависимость потенциала и тока от времени в условиях трибоэлектрического эффекта.

14. Предложена концепция антистатической обуви с заземляющими свойствами (патент на полезную модель № 204433) для повышения безопасности и эффективности работы в нефтегазоперерабатывающей отрасли и других чувствительных к статическому электричеству областях. Технологическое решение обуви позволяет изменять электрическое сопротивление в зависимости от условий эксплуатации. Для апробации идеи спроектирован и реализован с использованием аддитивных технологий токопроводящий элемент подошвы обуви. Результаты демонстрируют соответствие спроектированной обуви нормативным требованиям и позволяют утверждать о состоятельности разработанной модели для эксплуатации в реальных условиях, чувствительных к статическому электричеству областях.

15. Разработана открытая интегрированная база данных антистатических свойств обуви, позволяющая наращивать массив эмпирики и на его основе прогнозировать особенности новых комбинаций материалов. Показано, что интеграция совокупности сведений о характеристиках материалов, конструкциях обуви и взаимодействии с окружающей средой с программой «1С:Предприятие» позволяет получать прогнозные и контрольные свойства антистатической обуви, пригодные для эффективного управления ресурсами.

16. Разработаны стадии жизненного цикла создания научно обоснованной инновационной конструкции антистатической обуви. В результате системных научно-технических исследований установлены аксиоматические принципы

создания продукта, который отвечает требованиям безопасности и комфорта для пользователей в сложных производственных условиях. Проведенный комплекс работ и полученные на его основе результаты заключают в себе высокие потенциальные возможности успешной коммерциализации.

17. Результаты выполненных исследований позволят получить экономический эффект за счет совершенствования структуры ассортимента предприятий, изготавливающих специальную обувь, интеллектуализации труда работников на стадии предпроектных исследований, снижающей их продолжительность и трудоемкость. Социальный эффект выполненных исследований выражается в обеспечении персонала различных производств отечественной здоровьесберегающей обувью с высокими защитными свойствами, что снижает издержки предприятий на компенсационные выплаты, число случаев выхода на пенсию по инвалидности вследствие травматизма или профессиональной заболеваемости, количество опасных инцидентов, текучесть кадров из-за неудовлетворительных условий труда и положительно отражается на общей культуре безопасности.

18. Сформулированы перспективы дальнейшей разработки темы, которые сводятся к следующему: развитие базы данных об электростатических свойствах материалов и конструкций обуви для расширения функционала системы; внедрение современных методов анализа данных, включая возможности машинного обучения для прогнозирования характеристик новых комбинаций материалов и конструкций изделий. Предлагаемые решения могут быть использованы для создания общей базы данных как ядра с доступом к ней всех модулей САПР-К, САПР-ТП и САМ-систем при построении актуальных производственной и информационной инфраструктур; реализации архитектуры системы прогнозирования трибоэлектрических свойств материалов и обуви под воздействием различных факторов, создания конструкций с заданным функционалом в условиях надежности, многопользовательского доступа к ресурсам, минимального времени отклика и восстановления данных при отказах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ближайшее будущее рынка средств индивидуальной защиты. Онлайн-конференция «Перспективы развития рынка средств индивидуальной защиты в 2024–2026 годах» в рамках деловой программы Международной специализированной выставки и делового форума «Безопасность и охрана труда 2024» (БИОТ-2024) [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://eepir.ru/new/blizhajshee-budushhee-rynka-siz/>
2. Указ Президента Российской Федерации от 28 февраля 2024 г. № 145 «О Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации» [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://base.garant.ru/408618353/>
3. Распоряжение Правительства РФ от 06.06.2020 N 1512-р (ред. от 21.10.2024) «Об утверждении Сводной стратегии развития обрабатывающей промышленности Российской Федерации до 2030 года и на период до 2035 года» // Правовая справочно-информационная система «КонсультантПлюс». [Электронный ресурс]-Режим доступа: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_354707
4. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика. ТОМ VIII. Электродинамика сплошных сред. М.: Наука, 1982. - 621 с.
5. Кечиев Л.Н. Пожидаев ЕД. Защита электронных средств от воздействия статического электричества. М.: Издательский Дом «Технологии», 2005. - 352 с.
6. Хорват Т., Берта И. Нейтрализация статического электричества - М: Энергоатомиздат, 1987. - 104 с.
7. Изгородин А.К., Семикин А.П. Электризация волокнистых материалов.- Иваново: ИГТА, 2002. - 200 с.
8. Гефтер П.Л. Электростатические явления в процессах переработки химических волокон, - М.: Легпромбытиздат, 1989. - 272 с.
9. Каневская Ж.С, Добржанская А.К., Маркова Т.Ф. Клинико-физиологическая характеристика статического электрического поля на организм

человека // Материалы всесоюзной научной конференции «Гигиена труда и научно-технический прогресс». - Л., 1970. - с. 47-48.

10. ГОСТ Р 53734.4.2-2015 (IEC 61340-4-2:2013) Электростатика. Часть 4-2. Методы испытаний для прикладных задач. Электростатические свойства одежды. – М: Стандартинформ, 2016. – 44 с.

11. ГОСТ 12.4.124-83 Система стандартов безопасности труда. Средства защиты от статического электричества. Общие технические требования. – М: Изд-во стандартов, 1983. – 8 с.

12. ГОСТ IEC 61340-4-1-2017 Электростатика. Методы испытаний для прикладных задач. Электрическое сопротивление напольных покрытий и установленных полов. – М: Стандартинформ, 2018. – 11 с.

13. ГОСТ IEC 61340-4-3-2020 Электростатика. Методы испытаний для прикладных задач. Обувь. – М: Стандартинформ, 2020. – 11 с.

14. ГОСТ IEC 61340-4-5-2020 Электростатика. Методы испытаний для прикладных задач. Методы оценки электростатических свойств обуви и напольного покрытия в комбинации с человеком. – М: Стандартинформ, 2020. – 16 с.

15. ГОСТ IEC 61340-4-9-2021 Электростатика. Методы испытаний для прикладных задач. Одежда. – М: Стандартинформ, 2021. – 23 с.

16. ГОСТ IEC 61340-5-1-2019 Электростатика. Защита электронных устройств от электростатических явлений. Общие требования. – М: Стандартинформ, 2019. – 20 с.

17. ГОСТ IEC TR 61340-5-2-2021 Электростатика. Защита электронных устройств от электростатических явлений. Руководство по применению. – М: Стандартинформ, 2021. – 77 с.

18. ГОСТ Р ЕН ИСО 20345-2011 Система стандартов безопасности труда. Средства индивидуальной защиты ног. Обувь защитная. Технические требования. – М: Стандартинформ, 2012. – 24 с.

19. ГОСТ Р ЕН ИСО 20347-2013 Система стандартов безопасности труда. Средства индивидуальной защиты ног. Обувь специальная. Технические требования. – М: Стандартинформ, 2014. – 24 с.

20. ГОСТ Р 53734.3.1-2013 Электростатика. Методы моделирования электростатических явлений. Электростатический разряд. Модель человеческого тела. – М: Стандартинформ, 2014. – 8 с.
21. ТР ТС 007/2011 О безопасности продукции, предназначенной для детей и подростков [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/902308641>
22. ТР ТС 019/2011 О безопасности средств индивидуальной защиты [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/902320567>
23. ТР ТС 017/2011 О безопасности продукции легкой промышленности [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/902320564>
24. ГОСТ 32995-2014 Материалы текстильные. Методика измерения напряженности электростатического поля. – М: Стандартинформ, 2017. – 7 с.
25. Федеральный закон N 223-ФЗ «О закупках товаров, работ, услуг отдельными видами юридических лиц» от 18.07.2011 // Правовая справочно-информационная система «КонсультантПлюс» [Электронный ресурс] – Режим доступа: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_116964/
26. ГОСТ ИЕС 61340-2-3-2023 Электростатика. Методы определения сопротивления и удельного сопротивления твердых материалов, используемых для предотвращения накопления электростатического заряда. – М: Российский институт стандартизации, 2023. – 24 с.
27. Черунова И.В. Современные проблемы и перспективы создания специальной защитной одежды от тепловых потоков для нефтегазовой отрасли / Охрана труда и социальное страхование. Средства индивидуальной защиты – 2008. – № 6.- с. 20-21.
28. ГОСТ 12.4.137-2001 Обувь специальная с верхом из кожи для защиты от нефти, нефтепродуктов, кислот, щелочей, нетоксичной и взрывоопасной пыли. Технические условия. – М: Стандартинформ, 2019. – 28 с.
29. ГОСТ 25937-83 Материалы обувные. Метод определения удельных объемного и поверхностного электрических сопротивлений. – М: Изд-во стандартов, 1983. – 8 с.

30. Белицкая О.А. Карпухин А.А. Техническое регулирование как базовая основа качества материалов в области электростатической безопасности человека // Техническое регулирование: базовая основа качества материалов, товаров и услуг: Сборник научных трудов. – Шахты: ИСОиП (филиал) ДГТУ в г. Шахты, 2017. – с. 450-455.

31. ГОСТ Р ИСО 17697-2014 Обувь. Методы испытаний верха, подкладки и вкладных стелек. Прочность швов. – М: Стандартинформ, 2015. – 11 с.

32. ГОСТ Р ИСО 20869-2011 Обувь. Метод испытания подошв, стелек, подкладок и вкладных стелек. Определение содержания водорастворимых веществ. – М: Стандартинформ, 2012. – 7 с.

33. ГОСТ EN 50321-1-2023 «Система стандартов безопасности труда. Средства индивидуальной защиты ног. Обувь специальная для защиты от поражения электрическим током. Часть 1. Обувь и бахилы диэлектрические. Технические требования и методы испытаний». – М: Российский институт стандартизации, 2023. – 30 с.

34. ГОСТ 12.4.270-2014 Система стандартов безопасности труда. Обувь специальная дезактивируемая с текстильным верхом для работ с радиоактивными и химически токсичными веществами. Общие технические требования и методы испытаний. – М: Стандартинформ, 2015. – 8 с.

35. ГОСТ 12.4.032-95 Обувь специальная с кожаным верхом для защиты от действия повышенных температур. Технические условия. – М: Стандартинформ, 2020. – 16 с.

36. ГОСТ 12.4.242-2013 Система стандартов безопасности труда. Обувь специальная дополнительная для работ с радиоактивными и химически токсичными веществами. Общие технические требования и методы испытаний. – М: Стандартинформ, 2019. – 16 с.

37. ГОСТ 12.4.172-2019 Система стандартов безопасности труда. Средства индивидуальной защиты от электрических полей промышленной частоты. Комплекты индивидуальные экранирующие. Общие технические требования. Методы испытаний. – М: Стандартинформ, 2019. – 48 с.

38. ГОСТ 34734-2021 Средства индивидуальной защиты ног пожарного. Общие технические требования. Методы испытаний. – М: ФГБУ «РСТ», 2022. – 20 с.

39. ГОСТ 12.4.103-2020 Система стандартов безопасности труда. Одежда специальная защитная, средства индивидуальной защиты ног и рук. Классификация. – М: Российский институт стандартизации, 2023. – 18 с.

40. ГОСТ 12.4.129-2001 Система стандартов безопасности труда. Обувь специальная, средства индивидуальной защиты рук, одежда специальная и материалы для их изготовления. Метод определения проницаемости нефти и нефтепродуктов. – Минск: Изд-во стандартов, 2002. – 9 с.

41. ГОСТ Р 12.4.217-2000 Система стандартов безопасности труда. Обувь специальная кожаная. Метод определения проницаемости органических растворителей. – М: Изд-во стандартов, 2000. – 7 с.

42. ГОСТ Р 12.4.187-2024 Система стандартов безопасности труда. Обувь специальная для защиты от общих производственных загрязнений. Технические условия. – М.: Российский институт стандартизации, 2024. – 12 с.

43. ГОСТ 12.4.076-90 Система стандартов безопасности труда. Материалы для специальной кожаной обуви. Номенклатура показателей качества. – М: Изд-во стандартов, 1991. – 7 с.

44. ГОСТ 12.4.127-83 Система стандартов безопасности труда. Обувь специальная. Номенклатура показателей качества. – М: Изд-во стандартов, 1984. – 7 с.

45. Европейский стандарт EN ISO 20347:2012 Personal protective equipment - Occupational footwear / Средства индивидуальной защиты. Рабочая обувь [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.iso.org/standard/51033.html>

46. Европейский стандарт EN ISO 20345:2007 Personal protective equipment - Safety footwear. Amendment 1 (IDT) / Средства индивидуальной защиты — Защитная обувь. Поправка 1 (IDT) [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.iso.org/standard/43213.html>

47. Черунова И.В. Теоретические основы комплексного проектирования специальной теплозащитной одежды: дисс. ... доктора техн. наук: 05.19.04 / Черунова Ирина Викторовна. – Шахты, 2008. – 394 с.

48. ГОСТ ИЕС 61340-4-6-2019 Электростатика. Методы испытаний для прикладных задач. Антистатические браслеты. – М: Стандартинформ, 2019. – 19 с.

49. ГОСТ Р 52538-2006 Чистые помещения. Одежда технологическая. Общие требования. – М: Стандартинформ, 2006. – 20 с.

50. ГОСТ 31613-2012 Электростатическая искробезопасность. Общие технические требования и методы испытаний. Общие требования. – М: Стандартинформ, 2013. – 20 с.

51. Поленкова П.С., Белицкая О.А. Нормативная документация как базовая основа качества материалов при изготовлении обуви, предназначенной для детей и подростков // Концепции, теория, методики фундаментальных и прикладных научных исследований в области инклюзивного дизайна и технологий: сборник научных трудов по итогам Международной научно-практической заочной конференции (25-27 марта 2020 г.). Часть 2. – М.: РГУ им. А.Н. Косыгина, 2020. – 168 с., с. 37-41.

52. Постановление 2 от 01.03.2021 г. Об утверждении санитарных правил и норм СанПиН 1.2.3685-21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания» // Правовая справочно-информационная система «КонсультантПлюс» [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.consultant.ru/law/hotdocs/67487.html>

53. Белицкая О.А., Фокина А.А. Международная правовая система электростатической безопасности на производстве: антистатическая обувь и напольные покрытия // Сборник научных трудов Международного научно-технического симпозиума «Современные инженерные проблемы в производстве товаров народного потребления» IV Международного Косыгинского Форума «Проблемы инженерных наук: формирование технологического суверенитета», часть 1 (20-22 февраля 2024 года). - М.: РГУ им. А.Н. Косыгина, 2024. – 302 с., с. 165-170.

54. Белицкая, О. А. Основы моделирования трибоэлектрических свойств материалов для обуви: монография / О. А. Белицкая, И. Н. Леденева. – Москва: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Московский государственный университет дизайна и технологии», 2014. – 91 с. – ISBN 978-5-87055-207-1.

55. Setting the Global Standards for Static Control [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.esda.org>

56. ESD ADV1.0: Electrostatic Discharge Terminology Glossary [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://global.ihs.com>

57. Максимов Б.К., Обух А.А. Статическое электричество в промышленности и защита от него – М.: Энергия, 1978. – 80 с.

58. Материаловедение (дизайн костюма): учебник / Е.А. Кирсанова, Ю.С. Шустов, А.В. Куличенко, А.П. Жихарев. — Москва: Вузовский учебник: ИНФРА-М, 2025. — 395 с. - ISBN 978-5-9558-0665-5. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://znanium.ru/catalog/product/2188273>

59. Черкасов В.Н., Костарев Н.П. Пожарная безопасность электроустановок: Учебник. М.: Академия ГПС МЧС России, 2002. - 377 с.

60. Белицкая О.А., Севостьянов П.А., Самойлова Т.А. Компьютерная имитация электропроводных свойств материала для средств индивидуальной защиты // Технологии и качество. – 2024. - № 3 (65). – с. 5-10.

61. ГОСТ 12.0.003-2015 Система стандартов безопасности труда. Опасные и вредные производственные факторы. Классификация. – М: Стандартинформ, 2016. – 16 с.

62. Белицкая О.А., Сироткина О.В. К вопросу о необходимости применения на производстве антистатической обуви // Материалы докладов Международного научно-практического Симпозиума «Прогрессивные технологии и оборудование: текстиль, одежда, обувь» (3 ноября 2020 г.), - Витебск: УО «ВГТУ», 2020. – 249 с., с. 131-135.

63. IEC 61340-4-3:2017 Electrostatics - Part 4-3: Standard test methods for specific applications – Footwear / Электростатика. Часть 4-3. Стандартные методы

испытаний для особых применений. Обувь [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://webstore.iec.ch/en/publication/30767>

64. Зелинская В.А., Сироткина О.В., Белицкая О.А. Маркетинговое исследование рынка с целью определения критерий выбора рабочей обуви в различных отраслях производств // Сборник научных трудов «Эргодизайн как инновационная технология проектирования изделий и предметно-пространственной среды: инклюзивный аспект», Часть 2. – М.: РГУ им. А.Н. Косыгина, 2019. – 169 с. – с. 31 – 35.

65. Белицкая О.А. Антистатическая обувь: состояние производства и его перспективы: монография. – М.: ФГБОУ ВО «РГУ им. А.Н. Косыгина», 2022. – 189 с.

66. Белицкая О.А. Исследование электрического сопротивления и постоянной времени релаксации электростатического заряда специальной обуви // Костюмология. — 2024. — Т 9. — №3. — URL: <https://kostumologiya.ru/PDF/05TLKL324.pdf>

67. Fundamentals of Electrostatic Discharge – Part 1: An Introduction [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://incompliancemag.com>

68. Как характеристики материала влияют на статический заряд [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://npo-diod.com>

69. Сироткина, О.В. Разработка методики оценки безопасности специальной обуви по показателям антистатического статуса: дисс. ... канд. техн. наук: 05.19.05 / Сироткина Олеся Викторовна. – М., 2021. – 227 с.

70. Белицкая О.А., Хамов И.В. Целесообразность применения модели «антистатическая обувь-антистатический пол» на предприятиях и нормативно-правовое регулирование антистатических напольных покрытий в РФ // Фундаментальные и прикладные научные исследования в области инклюзивного дизайна и технологий: опыт, практика и перспективы / Сборник научных трудов IX Международной научно-практической конференции (25 – 27 марта 2023 г.). Часть 2. – М.: РГУ им. А.Н. Косыгина, 2023. – 321 с., с. 146-151.

71. Игнатова К.Л., Белицкая О.А. Биологическое воздействия электростатических полей на здоровье человека // Фундаментальные и прикладные научные исследования в области инклюзивного дизайна и технологий: опыт, практика и перспективы / Сборник научных трудов Международной научно-практической конференции (23 – 25 марта 2022 г.). Часть 1. – М.: РГУ им. А.Н. Косыгина, 2022. – 244 с., с. 193-197.

72. Черунова И.В., Меркулова А.В. Современные антиэлектростатические материалы для одежды и их свойства // Дизайн и технологии. – 2009. – № 12 (54). – с. 101-108.

73. Игнатова К.Л., Белицкая О.А. Исследование показателей напряженности ЭСП системы «человек – обувь – напольное покрытие» в зависимости от материалов обуви и вида напольного покрытия // Фундаментальные и прикладные научные исследования в области инклюзивного дизайна и технологий: опыт, практика и перспективы / Сборник научных трудов IX Международной научно-практической конференции (25 – 27 марта 2023 г.). Часть 2. – М.: РГУ им. А.Н. Косыгина, 2023. – 321 с., с. 53-58

74. Белицкая О.А. Проблемы совершенствования системы антистатической безопасности обуви на предприятиях нефтегазодобычи // Сборник научных трудов по материалам Международной научно-практической конференции «Перспективы развития науки и образования». В 7 частях. Часть IV. Мин-во обр. и науки – М.: «АР-Консалт», 2013 г.-172 с., с. 30-31.

75. Игнатова К.Л., Белицкая О.А., Фокина А.А. Исследование антистатических свойств повседневной обуви на различных напольных покрытиях // Инновационные технологии: кожа, мех, химические материалы, производство / Сборник научных трудов I Международной научно-практической конференции, посвященной памяти выдающегося советского ученого Чернова Н.В. (25 – 27 ноября 2023 г.). – М.: РГУ им. А.Н. Косыгина, 2023. – 156 с., с. 48-51.

76. Жихарев А.П., Краснов Б.Я., Петропавловский Д.Г. Практикум по материаловедению в производстве изделий легкой промышленности. Учеб.

пособие для студ. высш. учеб. заведений. – М.: Издательский центр «Академия», 2004. – 464 с.

77. Самсонова А.А., Белицкая О.А. Предпосылки развития антистатической обуви на российском рынке // Материалы X Международной научно-практической конференции «Фундаментальные и прикладные науки сегодня», том 1 - North Charleston, SC, USA, 2016. – 175 с., с. 90-92.

78. Зелинская В.А., Белицкая О.А. Анализ конструкций и технологий изготовления рабочей обуви различного назначения // Технологии, дизайн, наука, образование в контексте инклюзии: Сборник научных трудов. Часть 1. – М.: РГУ им. А.Н. Косыгина, 2018. – 253 с., с. 141-145.

79. Портянко Г.В., Белицкая О.А. Исследование современного рынка материалов, используемых для обуви специального назначения // Технологии, дизайн, наука, образование в контексте инклюзии: Сборник научных трудов. Часть 2. – М.: РГУ им. А.Н. Косыгина, 2018. – 244 с., с. 107-112.

80. ГОСТ 19616-74 Ткани и трикотажные полотна. Метод определения удельного поверхностного электрического сопротивления. – М: Изд-во стандартов, 1974. – 11 с.

81. ГОСТ 6433.2-71 Материалы электроизоляционные твердые. Методы определения электрического сопротивления при постоянном напряжении. – М: Изд-во стандартов, 1972. – 23 с.

82. ГОСТ Р 50344-92 Материалы электроизоляционные твердые. Методы испытаний для определения сопротивления изоляции. – М: Изд-во стандартов, 1992. – 12 с.

83. Прибор измерения поверхностного сопротивления покрытий и относительной влажности воздуха VKG A-770 [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://vkg.ru>

84. Орлова О.С., Белицкая О.А. Анализ принципов бережливого производства и применения их в различных отраслях легкой промышленности // Сборник научных трудов «Эргодизайн как инновационная технология

проектирования изделий и предметно-пространственной среды: инклюзивный аспект», Часть 2. – М.: РГУ им. А.Н. Косыгина, 2019. – 169 с. – с. 148-152.

85. Белицкая О.А. Анализ перспективности разработки обуви со специальными защитными свойствами // Сборник научных трудов Международного научно-технического симпозиума «Современные инженерные проблемы в производстве товаров народного потребления» Международного Косыгинского Форума «Современные задачи инженерных наук» (29-30 октября 2019 г.). – М.: РГУ им. А.Н. Косыгина, 2019. Часть 1. – 223 с., с. 25-29.

86. Соколовский А.Р. Развитие методов и совершенствование средств исследования физико-механических свойств волокнисто-пористых материалов легкой промышленности /дисс. ... доктора техн. наук: 05.19.01 // Соколовский Алексей Ратмирович. – М., 2010. – 546 с.

87. Рыкова Е.С., Фокина А.А., Белицкая О.А., Созинова У.С. Анализ дефектов и оценка качества специальной обуви //Актуальные проблемы экспертизы, технического регулирования и подтверждения соответствия продукции текстильной и легкой промышленности: Сборник трудов по итогам работы Круглого стола с международным участием. – М.: РГУ им. А.Н. Косыгина, 2021. – 115 с., с. 79-83.

88. Игнатова К.Л., Конарева Ю.С., Белицкая О.А. Формирование требований к качеству и разработка номенклатуры показателей качества обуви для детей школьного возраста // Костюмология, Journal of Clothing Science, 2022, №2, Том 7 - URL: <https://kostumologiya.ru/PDF/12TLKL222.pdf>

89. Белицкая О.А. Роль антистатической обуви при контроле статического электричества на производстве электроники // Исследования ВКР – в практику профессиональной жизни: Сборник материалов III Международной научно-практической межвузовской конференции. Часть 1. – М.: ФГБОУ ВО «РГУ им. А.Н. Косыгина», 2023. – 244 с., с. 23-26.

90. Буданова И. Принципы ESD-защиты: разработка программы защиты от электростатического разряда //Технологии в электронной промышленности. – 2020. – №. 7. – С. 58-61.

91. ANSI/ESD S20.20-2014 - Protection of Electrical and Electronic Parts, Assemblies and Equipment (Excluding Electrically Initiated Explosive Devices) [Электронный ресурс] – Режим доступа: [https://certifications.thomasnet.com/certifications/glossary/quality-](https://certifications.thomasnet.com/certifications/glossary/quality-certifications/ansi/ansi_esd-s20-20-2014/)

[certifications/ansi/ansi_esd-s20-20-2014/](https://certifications.thomasnet.com/certifications/glossary/quality-certifications/ansi/ansi_esd-s20-20-2014/)

92. Ивахников А.М., Белицкая О.А. Анализ рынка антистатической обуви // Фундаментальные и прикладные научные исследования в области инклюзивного дизайна и технологий: опыт, практика и перспективы / Сборник научных трудов IX Международной научно-практической конференции (25 – 27 марта 2023 г.). Часть 1. – М.: РГУ им. А.Н. Косыгина, 2023. – 316 с., с. 224-228

93. Brandt M. T. Choosing a floor management program for effective static control // Proceedings of the Technical Program, National Electronic Packaging and Production Conference: Anaheim, California, February 28, 29 and March 1, 1984. – Cahners Exposition Group, 1984. – С. 91.

94. Белицкая О.А. Сироткина О.В. Антистатическая обувь – как залог безопасности производства // Дизайн, технологии и инновации в текстильной и легкой промышленности (ИННОВАЦИИ-2020): сборник материалов Международной научно-технической конференции. Часть 1. – М.: ФГБОУ ВО «РГУ им. А.Н. Косыгина», 2020. – 271 с., с. 154-158.

95. Belitskaya O.A., Fokina A.A., Rykova E.S., Panferova E.G. Testing the Electrical Resistance of Materials for Protective Footwear Production // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering: International Science and Technology Conference (FarEastCon 2020) 6th-9th October 2020, Russky Island, Russia, Vladivostok, 28 января 2021 года. Vol. 1079. – Vladivostok: IOP Publishing, 2021. – P. 052-067. – DOI 10.1088/1757-899X/1079/5/052067.

96. Шандала М.Г. Проблемы гигиенической регламентации статического электрического поля как фактора городской и производственной среды: обзорная информация // Медицина и здравоохранение/ М.Г. Шандала, В.Я. Якименко, Л.В. Неумержицкая – Москва, 1989.- Вып.1. – 54 с.

97. Кадников О.Г., Кабизский В.И. ИК-спектры некоторых биологически важных макромолекул, подвергнувшихся воздействию статического электрического поля // Тр. Ленинградского института цитологии. Общие механизмы клеточных реакций на повреждающее воздействие. – Л., 1977. – с. 114-115.

98. Кадников О.Г., Товстяк В.В. Изучение влияния электростатического поля на эритроциты крови человека // Тр. Ленинградского института цитологии. Общие механизмы клеточных реакций на повреждающее воздействие. – Л., 1977. – с. 116-117.

99. Поленкова П.С., Белицкая О.А. Апробация методики измерения напряженности электростатического поля по ГОСТ 32995-2014 на примере материалов, используемых для заготовки верха обуви // Фундаментальные и прикладные научные исследования в области инклюзивного дизайна и технологий: опыт, практика и перспективы / Сборник научных трудов Международной научно-практической конференции (24 – 26 марта 2021 г.). Часть 2. – М.: РГУ им. А.Н. Косыгина, 2021. – 215 с., с. 178-182.

100. Белицкая, О.А. Установление корреляционных зависимостей антистатических показателей материалов для производства обуви специального назначения / О.А. Белицкая, В.В. Костылева // Промышленные процессы и технологии. – 2022. – Т. 2, № 3. – С. 47-56. – DOI 10.37816/2713-0789-2022-2-3(5)-47-56.

101. Белицкая О.А. Особенности метода измерения электрического сопротивления материалов низа обуви // «Дизайн и технологии», № 45(87). - Москва: МГУДТ 2015. -128 с., с. 15-18.

102. Арцруни Г.Г., Оганесян О.В. Электрофизические свойства ДНК при воздействии электростатического поля // Биологический журнал Армении. – 1982. – № 9. – с. 727-730.

103. Smallwood J., Swenson D. E., Viheriäkoski T. Relationship between footwear resistance and personal grounding through footwear and flooring. 40th Electrical

Overstress/Electrostatic Discharge Symposium (EOS/ESD), 2018, pp. 1-8, doi: 10.23919/EOS/ESD.2018.8509789.

104. Smallwood J., Swenson D. E. Evaluation of performance of footwear and flooring systems in combination with personnel using voltage probability analysis. 13th International Conference on Electrostatics IOP Publishing Journal of Physics: Conference Series 301 (2011) 012064 doi:10.1088/1742-6596/301/1/012064

105. Ковальчук Е.В., Чихунова С.Д., Саргуне А.И. Изучение влияния электростатического поля на частоту хромосомных aberrаций в соматических клетках // Тезисы докладов I Всесоюзного съезда медицинских генетиков – М., 1983. – с. 150-151.

106. Арцруни Г.Г., Межлулян Л.М., Саакян Р.А. Липидная пероксидация и некоторые факторы ее регуляции после воздействия электростатического поля // Биологический журнал Армении. – 1980. – № 11. – с. 1185-1187.

107. Станкевич К.И., Шумова Л.З. Влияние статических электрических полей на проницаемость клеточных мембран // Гигиена применения, токсикология пестицидов и полимерных материалов. – Киев, 1987. –с. 131-133.

108. Bean C., Bennett A. Conformational changes of polypeptides in intense electric fields /– Biopolimers, №4, 1973. – pp. 817-824.

109. Пирузян Л.А., Арцруни А.А., Романов Г.В. и др. Воздействие статического электрического поля на оксигемоглобин белых беспородных мышей // Изв. АН СССР. – 1984. – № 4. – с. 597-598.

110. Станкевич К.И., Алехина С.М., Ершова Л.К. и др. Биологические реакции организма животных при воздействии статического электрического поля малой интенсивности // Актуальные вопросы гигиены водного транспорта. – Одесса, 1984. – с. 48-48.

111. Gneno R., Azzar G., Got R. Permeabiliti of membrane of Babesia canis infected erythrocytes – influence of an external electric fields / Int. J. Bio-chem, № 12, 1986. – pp. 1151-1154.

112. Портянко Г.В., Сироткина О.В., Белицкая О.А. Оценка электрического сопротивления материалов, используемых для деталей специальной обуви //

Сборник научных трудов «Эргодизайн как инновационная технология проектирования изделий и предметно-пространственной среды: инклюзивный аспект», Часть 2. – М.: РГУ им. А.Н. Косыгина, 2019. – 169 с. – с. 80 – 84

113. Антипов В.В., Добров Н.Н., Добрышев В.И. и др. Некоторые биологические эффекты действия постоянного электрического поля высокого напряжения // Космическая биология. – 1983. – № 4. – с. 50-54.

114. Белицкая, О.А. Исследование влияния трибоэлектрических свойств обувных материалов на комфортность и электростатическую безопасность обуви: дисс. ... канд. техн. наук: 05.19.05/ Белицкая Ольга Александровна. – М., 2006. – 159 с.

115. Арцруни Г.Г., Зильфян А.В., Азгалдян Н.Р., Довлатян Р.А. Влияние внешнего электростатического поля на секрецию катехоламинов надпочечников крыс // Космическая биология. – 1987. – № 6. – с. 67-70.

116. Рапян Ю.А., Джингозян А.К., Тоноян Г.А. и др. Исследование структурного изменения коллагенового волокна сухожилий белых крыс в зависимости от влияния электростатического поля методом дифракции рентгеновских лучей // Журнал экспериментальной медицины. – 1985. – с. 231-232.

117. СП 29.13330-2011 «Полы» (актуализация СНиП 2.03.13-88), ч. 3 [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200084091>

118. Приказ Минрегиона РФ от 27.12.2010 N 785 «Об утверждении свода правил «СНиП 2.03.13-88 «Полы» [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200084091>

119. Федеральный закон от 30 декабря 2009 г. N 384-ФЗ «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений» // Правовая справочно-информационная система «КонсультантПлюс» [Электронный ресурс] – Режим доступа: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_95720/

120. ГОСТ Р 53734.5.6-2021 Электростатика. Защита электронных устройств от электростатических явлений. Микросхемы интегральные и приборы полупроводниковые. – М: Стандартинформ, 2021. – 20 с.

121. Пантелеев, А.В. Минипакетный метод адаптивного случайного поиска для параметрической идентификации динамических систем / А. В. Пантелеев, А. В. Лобанов // Автоматика и телемеханика. – 2020. – № 11. – С. 112-135. – DOI 10.31857/S0005231020110070.
122. Дьяконов, В.П. MATLAB. Полный самоучитель / В.П. Дьяконов. – Саратов: Профобразование, 2017. – 768 с. – ISBN 978-5-4488-0065-8.
123. Чандрасекар С. Стохастические проблемы в физике и астрономии / Пер. с англ. К.П. Гурова. Под ред. Н.Н. Боголюбова. - Москва: Гос. изд-во иностр. лит., 1947 (Тип. им. Евг. Соколовой в Л.). - 168 с.
124. Носков М.Д., Малиновский А.С., Кук Ч.М., Урайт К.А., Шваб А.Й. Моделирование развития разряда в объемно-заряженном диэлектрике. Журнал технической физики, 2002, том 72, вып. 4., с.107-112.
125. Леденева И.Н., Леденев М.О., Разин И.Б., Литвин Е.В., Белицкая О.А. Проектирование технологических процессов производства обуви с применением информационных технологий: монография. – М.: ФГБОУ ВПО «МГУДТ», 2015. – 131 с.
126. Севостьянов, П.А. Моделирование систем и процессов в задачах и примерах / П. А. Севостьянов. – Москва: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Российский государственный университет имени А.Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство)", 2024. – 258 с. – ISBN 978-5-00181-578-5
127. Растригин Л.А. Случайный поиск с линейной тактикой //Рига, Зинатне. – 1971 - 192 с.
128. Зайончковский А.Д., Краснов Б.Я. Некоторые новые проблемы в области конструирования антистатической обуви из полимерных материалов М. ВЗИТЛП, 1977
129. Костылева, В.В. Конструирование изделий из кожи / В. В. Костылева, В. М. Ключникова. – Москва: Издательский Дом "Инфра-М", 2022. – 353 с. – (Высшее образование: Бакалавриат). – ISBN 978-5-16-016411-3. – DOI 10.12737/1140659

130. Раяцкас В.Л., Краснов Б.Я., Лоев М.Л. Совершенствование химических и физических процессов технологии производства обуви/Обзорная информация. Обувная промышленность. 1979, №5, 48 с.
131. Горбачик В.Е. Конструкторско-технологические решения повышения эргономических свойств обуви: диссертация ... доктора технических наук: 05.19.06.- Витебск, 1998.- 442 с.
132. Yuqin Hu, Diansheng Wang, Jinyu Liu, Jianshen Gao, A case study of electro-static accidents in the process of oil-gas storage and transportation [Текст] // Journal of Physics: Conference Series 418. — 2013.
133. Прохоров А.М. и др. (ред.). Физический энциклопедический словарь. — М.: Советская энциклопедия, 1983.
134. Методические указания по определению электромагнитного поля воздушных линий электропередачи и гигиенические требования к их размещению: Методические указания. — М.: МЗ СССР, 1986. — 10 с.
135. Протасов В.Р., Сердюк О.А. Биоэлектрические поля: источники, характер, назначение // Успехи современной биологии. — 1982. — Т. 93. — Вып. 2. — с. 270-286.
136. Станкевич К.И. Биологическое действие и гигиеническая регламентация статического электричества, накапливаемого на синтетических полимерных материалах // Пластические массы. — 1975. — № 4. — с. 70-72.
137. Каневская Ж.С., Добржанская А.К., Маркова Т.Ф. Клинико-физиологическая характеристика статического электрического поля на организм человека // Материалы всесоюзной научной конференции «Ги-гиена труда и научно-технический прогресс». — Л., 1970. — с. 47-48.
138. Кривова Т.И., Морозов Ю.А., Якубенко А.В. и др. Гигиенические нормы допустимой напряженности электростатического поля // Сборник научных работ институтов охраны труда ВЦСПС. — М., 1981. — с. 131-136.
139. Biological effects of high voltage direct current transmission lines: Re-port to Montana Department of Natural Resources and Conservation /Sheppard A. - Obtainable from NTIS, 5285 Port Royal Road.: Springfield, 1983.

140. Habluetzel Ch., Sennhauser Th., Weidman U. Wirkungen des elektrischen Feldes auf den Menschen – Zurich: Studienarbeit am Institut für Hochspannungstechnik der ETH, 1978.

141. Altman G., Lang S., Lehman M. Psychotrope Wirkungen des Wetterschehens und Kunsteichen elektrischen Rechteckimpulsfeldes der Frequenz 10 Hz / Angew. Bader und Keimakeilki, 1976. № 23, s. 407-420.

142. Kirmaier N. Autofahrer: bessere Fahrleistung durch Impulsfelder / Umschau, 1978. № 14, s. 449-450.

143. Карташев А.Г., Лапшин В.П. Влияние физических факторов внешней среды на психофизиологическое состояние человека в условиях плавания // Живые системы в электромагнитных полях – Томск: Издательство Томского Университета, 1981.

144. Измерения статического электричества при производстве пластмасс. Листок технической информации. Выпуск №26 /Станкевич К.И., Цендровская В.А. – Киев: Мин. хим. пром. УССР, 1970. – с. 6-6.

145. Толстопятова В.Н., Кривова Т.И. О нормировании разрядов в электрическом поле // Сборник научных работ «Вопросы техники безопасности и производственной санитарии». – М.: Институт охраны труда ВЦСПС, 1982. – с. 101-105.

146. Измерение электризуемости обувных материалов. Экспресс-информация. / Кроткова Р.Д.- М.: ЦНИИИТЭИЛП, 1972.

147. Белицкая О.А. Антистатическая обувь, как элемент защиты от электростатических разрядов // Кожа и мех в XXI веке: технология, качество, экология, образование: Материалы XII Международной научно-практической конференции. – Улан-Удэ: Изд-во ВСГУТУ, 2016. - 464 с., с. 356-361.

148. Черунова И.В. Основы проектирования антиэлектростатической теплозащитной одежды (монография) / Черунова И.В., Меркулова А.В., Горчаков В.В., Бринк И.Ю.// Москва: Изд-во «Академия Естествознания», 2007.

149. Василенок Ю.И. Защита полимеров от статического электричества. -Л.: «Химия», 1975-192 с.

150. Куричина А.С., Белицкая О.А. Анализ альтернатив и выбор стратегии создания интерактивного пособия «Ассортимент экзотических кож в производстве обуви и кожгалантерейных изделий» // Технологии, дизайн, наука, образование в контексте инклюзии: Сборник научных трудов. Часть 1. – М.: РГУ им. А.Н. Косыгина, 2018. – 253 с., с. 126-132

151. Белицкая О.А., Карасева А.И. Шкуры млекопитающих – как экзотический вид кожи // Сборник научных трудов «Эргодизайн как инновационная технология проектирования изделий и предметно-пространственной среды: инклюзивный аспект», Часть 1. – М.: РГУ им. А.Н. Косыгина, 2019. – 167 с., с. 109 – 112

152. Синева О.В., Костылева В.В., Белицкая О.А. О рациональной детской обуви для правильного развития стопы // Сборник научных трудов «Эргодизайн как инновационная технология проектирования изделий и предметно-пространственной среды: инклюзивный аспект», Часть 1. – М.: РГУ им. А.Н. Косыгина, 2019. – 167 с., с. 131 – 136

153. Никитин Е.А., Конарева Ю.С., Белицкая О.А. Анализ потребительских свойств пушно-мехового полуфабриката для производства изделий легкой промышленности // Сборник научных трудов «Эргодизайн как инновационная технология проектирования изделий и предметно-пространственной среды: инклюзивный аспект», Часть 1. – М.: РГУ им. А.Н. Косыгина, 2019. – 167 с., с. 163 – 166

154. Ильясова А.В., Белицкая О.А. Анализ видов, конструкций и параметров женских каблучков // Сборник научных трудов «Эргодизайн как инновационная технология проектирования изделий и предметно-пространственной среды: инклюзивный аспект», Часть 2. – М.: РГУ им. А.Н. Косыгина, 2019. – 169 с. – с. 135 – 137

155. ЦПО Антистатическая обувь ESD [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.proshoes.ru>

156. ГОСТ 12.1.004-91 Система стандартов безопасности труда. Пожарная безопасность. Общие требования. – М: Стандартинформ, 2006. – 68 с.

157. ГОСТ 12.1.010-76 Система стандартов безопасности труда. Взрывобезопасность. Общие требования. – М: Изд-во стандартов, 1978. – 7 с.

158. ГОСТ 12.1.018-93 Система стандартов безопасности труда. Пожаровзрывобезопасность статического электричества. Общие требования. – Минск: Изд-во стандартов, 1994. – 7 с.

159. Конарева Ю.С., Царицына О.А., Белицкая О.А. Трансформационный подход к разработке современных аксессуаров // «Дизайн и технологии», № 46 (88). - Москва: МГУДТ 2015. -127 с., с. 29-32

160. ГОСТ 12.4.283-2019 Система стандартов безопасности труда. Средства индивидуальной защиты от электрических полей промышленной частоты и поражения электрическим током. Комплекты индивидуальные шунтирующие экранирующие. Общие технические требования. Методы испытаний. – М: Стандартиформ, 2019. – 28 с.

161. Белицкая О.А., Костылева В.В. Концептуальный дизайн обуви под девизом «Автомобили» // «Дизайн и технологии», № 57(99). – Москва: РГУ им. А.Н. Косыгина, 2017. -135 с., с. 14-21

162. ГОСТ 28507-99 Обувь специальная с верхом из кожи для защиты от механических воздействий. Технические условия. – М: Стандартиформ, 2016. – 23 с.

163. ТС N RU Д-RU.АГ03.В.07921. Декларация соответствия на сайте Росаккредитации. «Обувь специальная антистатическая рассеивающая для защиты от воздействия статического электричества: антистатические ботинки, ботинки с высокими берцами, полуботинки, сапоги, полусапоги, сандалеты, сабо из натуральной или искусственной кожи с подошвой из двухслойного антистатического полиуретана, в том числе обувь с внутренними защитными подносками ударной прочностью 200Дж т.з.: «ЦПО»

164. ТС N RU Д-RU.АЛ14.В.71441. Декларация соответствия на сайте Росаккредитации. «Средства индивидуальной защиты от статического электричества, в том числе с дополнительной защитой от механических

воздействий и общих производственных загрязнений: обувь специальная: бахилы, ботинки, полуботинки, туфли, галоши, боты, тапочки, сандалии, сабо».

165. Белицкая О.А., Сироткина О.В. Особенности параметров ESD-защиты антистатической обуви согласно нормативно-технической документации // Сборник статей «Современные тенденции развития науки, образования»: М.: Импульс, 2018. – 375с., с. 257-261.

166. Крупнейший производитель обуви ABEBA [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.projecthotel.ru/abeba/>

167. Ассортимент ABEBA. Антистатические стельки ABEBA 2590.3577 [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.protehnology.ru/>

168. Ассортимент ABEBA. Антистатические женские / мужские сабо ABEBA 2590.4045 [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.arttool.ru/>

169. Ассортимент GIASCO [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.aww.ru/>

170. Финская компания Sievi [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://sievirus.com/>

171. Ассортимент Sievi. Обувь RIFF WHITE SBAE и JAZZ WHITE SBAE [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://sievirus.com/>

172. ЗАО «ФПГ Энергоконтракт» [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.energocontract.ru>

173. Антистатическая обувь Авогадро. Ассортимент [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.lamsystems-lto.ru/katalog/>

174. ООО «Центр Профессиональной Обуви». Ассортимент [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.proshoes.ru/>

175. Фокина А.А., Соколовский А.Р., Рыкова Е.С., Белицкая О.А. Оценка показателей качества обуви специального назначения // Оригинальные исследования. – 2020. – Т. 10. – №. 9. – с. 62-77.

176. Белицкая О.А., Максимова И.А. Особенности применения кожи рыб при производстве обуви // Сборник научных статей и воспоминаний «Памяти В.А. Фукина посвящается». Часть 1. – М.: МГУДТ, 2014. – 219 с., с. 107-111.

177. Постановление Правительства РФ от 04.08.2015 N 785 (ред. от 27.05.2024) «О Правительственной комиссии по импортозамещению» (вместе с «Положением о Правительственной комиссии по импортозамещению») // Правовая справочно-информационная система «КонсультантПлюс» [Электронный ресурс] – Режим доступа: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_183941/

178. Популярно о спецодежде и СИЗ [Электронный ресурс] – Режим доступа: URL: <https://www.getsiz.ru/>

179. Ушакова Н. С., Брюхов Г. М. Методы индивидуальной защиты на предприятии //Рабочая одежда. – 2005. – Т. 4. – с. 31.

180. ГОСТ 15467-79. Управление качеством продукции. Основные понятия. Термины и определения. – М: Стандартиформ, 2009. – 22 с.

181. Товароведение и экспертиза кожаной продукции [Текст]: учебник / под ред. В.Я. Ивановой, О.А. Голубенко — М.: Дашков и Ко, 2011. – 346 с.

182. Иванов М.Н. Товароведение обувных товаров [Текст]: учеб. пособие / М.Н. Иванов, И.Г. Шакланов, В.А. Панасенко. — М.: Экономика, 1990. — 320 с.

183. Белицкая О.А., Сироткина О.В. Разработка методики оценки безопасности специальной обуви под влиянием внешних факторов// Дизайн и технологии - № 74 (116). – Москва: РГУ 2019. - с. 31-38.

184. Грошева Н.Н. Оценка качества обуви. - учебное пособие / Н.Н. Грошева, В.В. Костылева – М.: ИИЦ МГУДТ, 2009. – 71 с.

185. Shahbabu B. et al. Anti-Static Shoes Safety Work Shoes for Industrial Protective //Journal of Clinical and Diagnostic Research: JCDR. – 2016. – Т. 10. – №. 3. – с. 11.

186. Burgatti J. C., Lacerda R. A. Genuine Leather Steel Toe Antistatic Safety Shoes/Work Shoes //Revista da Escola de Enfermagem da USP. – 2009. – Т. 43. – №. 1. – с. 237-244

187. Jin H. Y., Leng Q. ESD Shoes, Antistatic Boots (ESD High Boots) Safety Industrial Used Cleanroom Boots //World Journal of Gastroenterology: WJG. – 2015. – Т. 21. – №. 2. – с. 623.

188. Peroni C. N. et al. Good Quality ESD Safety Cleanroom Shoes Anti Static Canvas Shoes //Clinics. – 2012. – Т. 67. – №. 3. – с. 265-272.

189. Datta P., Mohi G. K., Chander J. Full Automatic Anti-Static Nonwoven Shoes Cover Making Machine //Journal of Laboratory Physicians. – 2018. – Т. 10. – №. 1. – с. 6.

190. P. Tolson, L. Beet The use of antistatic footwear in the resin manufacturing industry // Journal of Occupational Accidents, Volume 8, Issue 4, 1987, Pages 251-260, [https://doi.org/10.1016/0376-6349\(87\)90002-2](https://doi.org/10.1016/0376-6349(87)90002-2)

191. Pedro Llovera-Segovia, Marcos Domínguez-Lagunilla, Vicente Fuster-Roig, Alfredo Quijano-López Electrostatics comfort in buildings and offices: Some experiences and basic rules, // Journal of Electrostatics, Volume 115, 2022, 103650, ISSN 0304-3886, <https://doi.org/10.1016/j.elstat.2021.103650>

192. Garcia E. E. et al. ESD Anti Static Rubber Sole Anti Skid Safety Shoes //Brazilian Archives of Biology and Technology. – 1999. – Т. 42. – №. 3. – с. 281-290.

193. Приказ Минтруда РФ от 9.12.2014 г. N 997н «Об утверждении типовых норм бесплатной выдачи специальной одежды, специальной обуви и других средств индивидуальной защиты работникам сквозных профессий и должностей всех видов экономической деятельности, занятым на работах с вредными и (или) опасными условиями труда, а также на работах, выполняемых в особых температурных условиях или связанных с загрязнением» (Зарегистрирован Министерством юстиции Российской Федерации 20 октября 2008 г., N 12499) [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://base.garant.ru/70878606/>

194. Приказ Минздравсоцразвития РФ от 22.06.2009 г. N 357н «Типовые нормы бесплатной выдачи специальной одежды, специальной обуви и других средств индивидуальной защиты работникам автомобильного транспорта и шоссейных дорог, занятым на работах с вредными и (или) опасными условиями труда, а также на работах, выполняемых в особых температурных условиях или связанных с загрязнением» [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://base.garant.ru/196271/>

195. Белицкая О.А., Леденева И.Н. Исследования электростатических обувных войлоков // Кожевенно-обувная промышленность. – 2006. - № 4. - с. 38-39.

196. Орлова О.С., Белицкая О.А. Анализ и создание матричной базы ассортимента обувного предприятия // Концепции, теория, методики фундаментальных и прикладных научных исследований в области инклюзивного дизайна и технологий: сборник научных трудов по итогам Международной научно-практической заочной конференции (25-27 марта 2020 г.). Часть 2. – М.: РГУ им. А.Н. Косыгина, 2020. – 168 с., с. 85-90.

197. Косенкова А.В., Белицкая О.А. Анализ возможных рисков при размещении заказов в странах Юго-Восточной Азии // Концепции, теория, методики фундаментальных и прикладных научных исследований в области инклюзивного дизайна и технологий: сборник научных трудов по итогам Международной научно-практической заочной конференции (25-27 марта 2020 г.). Часть 3. – М.: РГУ им. А.Н. Косыгина, 2020. – 170 с., с. 66-70.

198. Мендалиева Ф.А., Белицкая О.А. Анализ современных способов графической интерпретации результатов исследований // Анализ современных способов графической интерпретации результатов исследований // Фундаментальные и прикладные научные исследования в области инклюзивного дизайна и технологий: опыт, практика и перспективы / Сборник научных трудов Международной научно-практической конференции (24 – 26 марта 2021 г.). Часть 2. – М.: РГУ им. А.Н. Косыгина, 2021. – 215 с., с. 150-155.

199. Мендалиева Ф.А., Белицкая О.А. Применение программного продукта ORIGIN для графической визуализации результатов исследований в обувной промышленности // Инновационное развитие техники и технологий в промышленности: сборник материалов Всероссийской научной конференции молодых исследователей с международным участием. Часть 1. – М.: ФГБОУ ВО «РГУ им. А.Н. Косыгина», 2021. – 328 с., с. 183-185.

200. Конарева Ю.С., Максимова И.А., Белицкая О.А. О применении технологий 3D-печати в сумках // Сборник научных трудов Международного научно-технического симпозиума «Современные инженерные проблемы в

производстве товаров народного потребления» III Международного Косыгинского Форума «Современные задачи инженерных наук» (20-21 октября 2021 года). - М.: «РГУ им. А.Н. Косыгина», 2021. – 327 с., с. 129-133.

201. Курпитко К.Е., Конарева Ю.С., Белицкая О.А. Фермуары и их возвращение в моду // Фундаментальные и прикладные научные исследования в области инклюзивного дизайна и технологий: опыт, практика и перспективы / Сборник научных трудов Международной научно-практической конференции (23 – 25 марта 2022 г.). Часть 2. – М.: РГУ им. А.Н. Косыгина, 2022. – 239 с., с. 99-104.

202. Евтеева Н.Г., Дормидонтова О.В., Окутин А.С., Белицкая О.А. Применение электрохимически активированных растворов в технологических процессах производства кожи и меха // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. 2022. № 1 (397). С. 206-211.

203. Липилина В.А., Конарева Ю.С., Белицкая О.А. Фигурные вырезы как способ декорирования изделий из кожи // В сборнике: Инновации и технологии к развитию теории современной моды, "Мода (Материалы. Одежда. Дизайн. Аксессуары)", посвящённая Фёдору Максимовичу Пармону. Сборник материалов II Международной научно-практической конференции. Москва, 2022., с. 439-442.

204. Кудинкина И.К., Белицкая О.А. Применение технологии 3D-печати multi jet modeling при изготовлении фурнитуры коллекции кожгалантереи и аксессуаров // Мотивы культурных традиций и народных промыслов в коллекциях современной одежды, обуви и аксессуаров / Сборник научных трудов I Международной научно-практической конференции (7 ноября 2023 г.). – М.: РГУ им. А.Н. Косыгина, 2023. – 217 с., с. 75-80.

205. Белицкая О.А., Кочетков Н.С., Фокина А.А. Применение металлизированной каракульчи при разработке коллекции обуви // Инновационные технологии: кожа, мех, химические материалы, производство / Сборник научных трудов I Международной научно-практической конференции, посвященной памяти выдающегося советского ученого Чернова Н.В. (25 – 27 ноября 2023 г.). – М.: РГУ им. А.Н. Косыгина, 2023. – 156 с., с. 42-47.

206. Пат. № CN 2014146278 (A1) Footwear conductive loop and footwear thereof. Обувь проводящего контура / Kek Hing Kow; патентообладатель: ESD Technology Consulting & Licensing Co Ltd; опубл. 25.09.2014; A43B7/36.

207. Пат. № KR 2013028025 (A3) Shoe comprising electrical stimulation means comprising flexible electric transfer electrode portion. Обувь, содержащая средства электрической стимуляции и часть переноса электрода / Kim Mi Yung, Nam Jung Bok, Lee Byung Ha, Park Hyun Woo; патентообладатели: Endeo Co Ltd; Kim Mi Yung; Nam Jung Bok; Lee Byung Ha; Park Hyun Woo; опубл. 28.02.2013; A43B7/36; A61N1/36.

208. Пат. № ES 2012059613 (A1) Footwear insole that discharges static by means of grounding. Стелька для обуви, которая разряжается путем заземления / Moreno Olmo Aurora; опубл. 10.05.2012; A43B7/36.

209. Пат. № KR 2008069524 (A1) Footwear sole having an electric discharge effect. Обувная подошва с электрическим разгрузочным эффектом / Jeong Jae Gu; опубл. 12.06.2008; A43B7/36.

210. Пат. № CA 2011072689 (A1) Electronic device for safety footwear. Электрическое устройство для безопасности стоп / La Rochelle Simon; опубл.: 31.03.2011; A43B13/14; A43B23/00.

211. Пат. № TW 2010205833 (A1) Anti-Static Sole. Антистатическая подошва/Wang San-Huai; патентообладатели: Wang San-Huai; New Process Corp; опубл. 19.08.2010; A43B13/12; A43B13/38; A43B19/00.

212. Пат. № US 2013126751 (A1) Footwear having sensor system. Обувь с сенсорной системой/Owings Andrew A, Rice Jordan M, Schrock Allan M; патентообладатель: Nike International LTD; опубл.: 29.08.2013; A43B13/12; A43B13/14; A43B13/20; A43B13/38; A43B3/00; A43B7/08.

213. Пат. № ES 2016042175 (A1) Assembly of an electroconductive sole and an electroconductive insole for footwear. Сборка электропроводящей подошвы и электропроводной стельки для обуви / Prades Gil Luis; опубл.: 24.03.2016; A43B7/36.

214. Пат. № MY 2012121585 (A3) Epoxidised natural rubber based blend for antistatic footwear application. Эпоксидированная смесь на основе натурального каучука для антистатической обуви/Kok Chong Yong, Mohamad Asri Ahmad; опубл.: 13.09.2012; A43B1/10; A43B7/36; C08J3/22; C08J3/247; C08K3/04.

215. Пат. № IT 2014166785 (A1) Insert for footwear. Вкладыш для обуви/Giancarlo Boscariol; патентообладатель: Giancarlo Boscariol; опубл. 16.10.2014; A43B17/00; A43B17/04; A61N2/00.

216. Пат. № MY 2011088758 (A1) Antistatic shoes. Антистатическая обувь/Kow Kek Hing; патентообладатель: Kow Kek Hing; опубл. 28.07.2011; A43B7/36.

217. Пат. № MY 2010101452 (A1) An electrostatic dissipative shoe assembly. Сборка электростатической диссипативной обуви/ Kow Kek Hing; патентообладатель: Kow Kek Hing; опубл. 10.09.2010; A43B3/16; A43B7/00; A43B7/36.

218. Пат. № MY 2009091236 (A1) An electrostatic discharge shoe cover. Антистатические бахилы/Kow Kek Hing; патентообладатель: Kow Kek Hing; опубл. 23.07.2009; A43B3/16; A43B3/20; A43B7/36.

219. Пат. № CN 2008119257 (A1) Antistatic shoes. Антистатическая обувь/Wan Xianneng; патентообладатель: Wan Xianneng; опубл. 09.10.2008; A43B7/36.

220. Пат. № AT 2008058984 (A1) Shoe with an electrically conductive sole. Обувь с электропроводящей подошвой/Wiebecke Adolf; патентообладатель: Wiebecke Adolf; опубл. 22.05.2008; A43B7/36; A61N1/14.

221. Пат. № KR 2008026824 (A1) Insole to eliminate electrostatics. Стелька, устраняющая электростатику/Kim Han Geun, Park Jung Sik, Jung Jin Hyun; патентообладатели: Kim Han Geun, Park Jung Sik, Jung Jin Hyun; опубл. 06.03.2008; A43B17/00.

222. Пат. № ES 2005077217 (A1) Shoe comprising a static electricity discharge device. Обувь с антистатическим устройством/Asendio Benedi Jose Manuel, Luna

Gimeno Pedro; патентообладатели: Antoranz Hernandez Gregorio, Asendio Benedi Jose Manuel, Luna Gimeno Pedro; опублик. 25.08.2005; A43B7/36; A43B7/36.

223. Пат. № US 2008289217 (A1) Footwear. Обувь/Horvath Juliu; патентообладатель: Horvath Juliu; опублик. 27.11.2008; A43B13/00; A43B7/14.

224. Пат. № US 2007000155 (A1) Shoes with electrostatical grounding. Обувь с электростатическим заземлением/ Laufer Mark, Rudneva Maria; опублик. 04.01.2007; A43B23/00.

225. Пат. № US 7471497 (B1) Electrostatic discharge prevention device. Устройство, защищающее от статического электричества/ Knight Sr William C, Knight Teri L; опублик. 30.12.2008; H05F3/00.

226. Пат. № US 7424782 (B2) Electrically conductive shoe and system. Электропроводящая обувь и система/Cheskin Melvyn; опублик. 16.09.2008; A43B7/00; A43B7/36.

227. Пат. № JP 20070048655 (A) Static eliminating function-carrying footwear. Антистатическая функциональная обувь/ Hasegawa Masahiro; опублик. 09.05.2007; A43B13/14; A43B7/36.

228. Пат. № BE 2873339 (A1) Clean room shoe sole. Обувь для чистых помещений/Raf Michiels; патентообладатель: Wolfstar; опублик. 20.05.2015; A43B13/04; A43B7/36.

229. Пат. № IT 2074899 (B1) Method for manufacturing antistatic shoes. Метод создания антистатической обуви/Baldin Francesco; патентообладатель: Baldin Francesco; опублик. 27.02.2013; A43B3/10; A43B7/36; B29C65/58; B29C65/66; B29D35/00; B29D35/04; B29L31/50.

230. Пат. № RU 201710561 (A). Антистатический комплект с периодическим снижением напряженности электростатического поля // Алисевич Е.А. (RU), Дудыкина В.К. (RU), Котоменков Д.Е. (RU), Котоменкова О.Г. (RU), Санджиева И.В. (RU), Стародубцев Ю.И. (RU); заявл. 20.02.2017; опублик. 20.08.2018; Бюл. № 23.

231. Пат. № RU 2400112 (C2) IT Antistatic shoes. Антистатическая обувь/ RIGETTO Luchio; заявл. 29.12.2005, опублик. 27.09.2010.

232. Пат. № RU 2 471 823 (C2) DE Покрытие субстрата, содержащее комплекс ионного фторполимера и поверхностно заряженные наночастицы / Бюргер Вольфганг, Штеффль Рудольф; Патентообладатель(и): В.Л. ГОР ЭНД АССОШИЭЙТС ГМБХ; Оpubл.:10.01.2013; Бюл. № 1.

233. Белицкая О.А., Сироткина О.В. Патентное исследование совершенствования конструкции обуви с антистатическим эффектом // Сборник материалов докладов международной научно-технической конференции «Дизайн, технологии и инновации в текстильной и легкой промышленности» Часть 1, М.: ФГБОУ ВО «РГУ им. А.Н. Косыгина», 2018. – 257 с., с. 115-119.

234. Приказ Минздравсоцразвития РФ от 16.07.2007 N 477. "Об утверждении Типовых норм бесплатной выдачи сертифицированных специальной одежды, специальной обуви и других средств индивидуальной защиты работникам, занятым на строительных, строительно-монтажных и ремонтно-строительных работах с вредными и (или) опасными условиями труда, а также выполняемых в особых температурных условиях или связанных с загрязнением" (Зарегистрировано в Минюсте РФ 16.10.2007 N 10332) [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://base.garant.ru/12156639/>

235. Приказ Минздравсоцразвития России от 14.12.2010 N 1104н (ред. от 20.02.2014) "Об утверждении Типовых норм бесплатной выдачи специальной одежды, специальной обуви и других средств индивидуальной защиты работникам машиностроительных и металлообрабатывающих производств, занятым на работах с вредными и (или) опасными условиями труда, а также на работах, выполняемых в особых температурных условиях или связанных с загрязнением" (Зарегистрировано в Минюсте России 21.01.2011 N 19559) [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://base.garant.ru/12182285/>

236. Приказ Минтруда России от 01.11.2013 N 652н. "Об утверждении Типовых норм бесплатной выдачи специальной одежды, специальной обуви и других средств индивидуальной защиты работникам горной и металлургической промышленности и металлургических производств других отраслей промышленности, занятым на работах с вредными и (или) опасными условиями

труда, а также на работах, выполняемых в особых температурных условиях или связанных с загрязнением " (Зарегистрировано в Минюсте России 31.12.2013 N 30969) [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://base.garant.ru/70564790/>

237. Приказ Минздравсоцразвития России от 09.12.2009 N 970н (ред. от 20.02.2014) "Об утверждении Типовых норм бесплатной выдачи специальной одежды, специальной обуви и других средств индивидуальной защиты работникам нефтяной промышленности, занятым на работах с вредными и (или) опасными условиями труда, а также на работах, выполняемых в особых температурных условиях или связанных с загрязнением" (Зарегистрировано в Минюсте России 27.01.2010 N 16089) [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://base.garant.ru/197363/>

238. Приказ Минздравсоцразвития России от 11.08.2011 N 906н (ред. от 20.02.2014) "Об утверждении Типовых норм бесплатной выдачи специальной одежды, специальной обуви и других средств индивидуальной защиты работникам химических производств, занятым на работах с вредными и (или) опасными условиями труда, а также на работах, выполняемых в особых температурных условиях или связанных с загрязнением" (Зарегистрировано в Минюсте России 05.09.2011 N 21737) [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://base.garant.ru/55172114/>

239. Приказ Минздравсоцразвития России от 25.04.2011 N 340н (ред. от 20.02.2014) "Об утверждении Типовых норм бесплатной выдачи специальной одежды, специальной обуви и других средств индивидуальной защиты работникам организаций электроэнергетической промышленности, занятым на работах с вредными и (или) опасными условиями труда, а также на работах, выполняемых в особых температурных условиях или связанных с загрязнением" (Зарегистрировано в Минюсте России 24.05.2011 N 20834) [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://base.garant.ru/55171456/>

240. Белицкая О.А., Сироткина О.В. Экспериментальное определение взаимосвязи напряженности электростатического поля и электростатического

потенциала обувных конструкций // Дизайн и технологии - № 72 (114). – Москва: РГУ 2019. - с. 29-33.

241. Рустамов М.М., Хамракулова М.А., Эрматов Н.Ж. Условия труда работников нефтегазодобывающей промышленности // Проблемы науки. 2018. № 8 (32)., с. 48-50.

242. Кашуба В.А., Амелькович Ю.А. Анализ вредных и опасных факторов на предприятиях нефтегазового комплекса // Информационные технологии (ИТ) в контроле, управлении качеством и безопасности. Сборник научных трудов VIII Международной конференции школьников, студентов, аспирантов, молодых ученых «Ресурсоэффективные системы в управлении и контроле: взгляд в будущее». 2019., с. 106-109.

243. Галкин А.Ф., Хусаинова Р.Г. Оценка и ранжирование неблагоприятных производственных факторов на нефтегазовом предприятии Севера // Фундаментальные исследования. 2012. № 6-3. С. 637-641.

244. Азизходжаев А.А. Общая и неврологическая заболеваемость рабочих, занятых добычей и транспортировкой нефти и нефтепродуктов // Актуальные проблемы гигиены, санитарии и экологии. 2004., с. 220-221.

245. Бархотова Л.А. Оценка опасности токсического воздействия специфических поллютантов на население, проживающее в зоне Оренбургского газохимического комплекса // Гигиена и санитария. 2002. № 5., с. 11-14.

246. Алексеенко Д.А., Дегтева Г.Н. Оценка микроклимата на рабочих местах различных специалистов нефтепромыслов Заполярья // Медицина труда и промышленная экология. 2008. № 4., с. 22-27.

247. Горбанев С.А., Сюрин С.А. Риски здоровью и профессиональная патология при добыче топливно-энергетических ископаемых в Арктической зоне России // Российская Арктика. 2019. № 6., с. 55-64.

248. Профилактика профессиональных заболеваний, вызванных сочетанным воздействием вибрации, шума и охлаждающего микроклимата на предприятиях горнодобывающей промышленности: Методические рекомендации. Москва, 1991. 23 с.

249. Измеров Н.Ф. Проблемы медицины труда на Крайнем Севере // Медицина труда и промышленная экология. 1996. № 5., с. 1-4.
250. Мышинская Ж.М. Влияние климатических и экологических факторов на здоровье человека в условиях Крайнего Севера // Ямальский вестник. – 2016. – №. 2. – с. 79-80.
251. Перспективы мирового рынка антистатической обуви в 2022 г. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.360researchreports.com/global-anti-static-shoes-market-19854874>
252. Хасанова А.Ф., Штур В. Б., Шайбаков Р.А. Аварийность и травматизм на объектах нефтепереработки // Нефтегазовое дело: электрон, науч. журн./УГНТУ. 2016. № 6. С. 161-176. [Электронный ресурс] – Режим доступа: http://ogbus.ru/issues/6_2016/ogbus_6_2016_p_161-176_KhasanovaAF_ru.pdf
253. Китаев С. В., Смородова О. В., Кузнецова Е. В. Восстановление зависимостей взаимосвязи параметров внешней газовой среды предприятий нефтепереработки // Нефтегазовое дело: электрон, науч. журн./УГНТУ. 2016. №6. С.121-137. [Электронный ресурс] – Режим доступа: http://ogbus.ru/issues/6_2016/ogbus_6_2016_p_121-137_KitaevSV_ru.pdf
254. Бринк И. Ю., Щеникова Е. А., Кулешова А. А. Исследование профиля потенциала электростатического поля в альпийской зоне как потенциального возобновляемого микроисточника энергии // Инженерный вестник Дона. – 2013. – Т. 26. – №. 3 (26). – с. 112.
255. Черунова И.В., Меркулова А.В. Специальная антиэлектростатическая теплозащитная одежда – современные проблемы и особенности проектирования [Текст] // Швейная промышленность – М., 2008. - Вып.3. – с .39-40.
256. Белицкая О.А., Сироткина О.В. Оценка антистатических показателей специальной обуви в условиях пониженных температур // сборник научных трудов «Концепции, теория, методики фундаментальных и прикладных научных исследований в области инклюзивного дизайна и технологий» по итогам Международной научно-практической заочной конференции (25-27 марта 2020 г.): Часть 1. – М.: РГУ им. А.Н. Косыгина, 2020. – 170 с., с. 158-163.

257. Electrical Safety – Static Electricity [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.safetymanualosha.com>

258. Биев А.А., Шпак А.В. Проблемы нефтепродуктообеспечения арктических регионов России // Проблемы развития территории. Выпуск 2(88), 2017, с. 51-62.

259. О компании «Лукойл» [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.lukoil.ru/>

260. История компании [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.teboil.ru/>

261. Деятельность компании [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.lukoil.ru>

262. ТПП «ЛАНГЕПАСНЕФТЕГАЗ» [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://zs.lukoil.ru/>

263. Климат Ханты-Мансийского АО [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.hantymansiiskao.ru>

264. Минец В.В., Белицкая О.А. Инновационные 3D-технологии в создании коллекции обуви и аксессуаров // Материалы IX Международной научно-практической конференции «Академическая наука – проблемы и достижения» - North Charleston, SC, USA, 2016. – 180 с., с. 75-77.

265. Белицкая О.А. 3D-технологии в коллекциях обуви и аксессуаров // Сборник материалов докладов 53-й Международной научно-технической конференции преподавателей и студентов (апрель 2020 г.), Том 2. – Витебск: УО «ВГТУ», 2020. – 351 с., с. 137-139.

266. Минец В.В., Белицкая О.А. Экономическая эффективность применения 3D-печати в лёгкой промышленности // Сборник материалов докладов 54-й Международной научно-технической конференции преподавателей и студентов (апрель 2021 г.), Том 2. – Витебск: УО «ВГТУ», 2021. – 351 с., с. 138-140.

267. Сироткина О.В., Белицкая О.А. Сравнительный анализ динамики накопления электростатического заряда бытовой и специальной антистатической

обуви // Технологии, дизайн, наука, образование в контексте инклюзии: Сборник научных трудов. Часть 2. – М.: РГУ им. А.Н. Косыгина, 2018. – 244 с., с. 174-178.

268. Гляциологический словарь // под ред. Котлякова В.М. Гидрометеиздат, Ленинград, 1984 г. – 564 с.

269. Европейский стандарт EN ISO 20344 Personal protective equipment — Test methods for footwear / Средства индивидуальной защиты. Методы испытаний обуви [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.iso.org/standard/73221.html>

270. Белицкая О.А., Шестакова А.В. Возможности применения ТПУ-пластика при 3D-печати деталей обуви // Сборник научных трудов Международного научно-технического симпозиума «Современные инженерные проблемы в производстве товаров народного потребления» IV Международного Косыгинского Форума «Проблемы инженерных наук: формирование технологического суверенитета», часть 1 (20-22 февраля 2024 года). - М.: РГУ им. А.Н. Косыгина, 2024. – 302 с., с. 98-101.

271. Материалы шумопоглощающих устройств каблуков обуви / О.А. Белицкая, В. В. Костылева, А. А. Фокина [и др.] // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. – 2023. – № 3(405). – С. 243-249. – DOI 10.47367/0021-3497_2023_3_243.

272. Material Parameter Assessment for Noise-Absorbing Devices in Shoe Heels / O. A. Belitskaya, V. V. Kostyleva, E. S. Rykova [et al.] // Materials Science Forum. – 2023. – Vol. 1082. – P. 156-161. – DOI 10.4028/p-03z8n6.

273. Белицкая О.А., Леденева И.Н. Специальная обувь для нефтяников, работающих в условиях Крайнего Севера // Кожевенно-обувная промышленность. – 2006. – № 3. – с. 50-51.

274. Белицкая О.А., Леденева И.Н. Проектирование обуви пригодной для эксплуатации в нефтегазовом комплексе в условиях Крайнего севера // Научная сессия МИФИ-2006. Сборник научных трудов. В 16 томах. Т.11. Инновационные проекты, студенческие идеи, проекты, предложения. – М.: МИФИ, 2006. – с. 72-73.

275. Белицкая О.А., Бирюкова М.Ф., Леденева И.Н. Исследование трибоэлектрических свойств обувных материалов // Вестник Московского государственного университета дизайна и технологии. Выпуск №2 (44). – М.: ИИЦ МГУДТ, 2004. – с. 181-185.

276. Рябов Ю.Г., Салихов З.С., Шологин О.Н., Мурашов А.И., Котляров А.А. Концепция потенциальной электромагнитной безопасности // Экология и промышленность России, июль 2005. - с. 42-45.

277. Игнатова К.Л., Белицкая О.А. О возможности разработки конструкции антистатической обуви с ионизирующим эффектом // Фундаментальные и прикладные научные исследования в области инклюзивного дизайна и технологий: опыт, практика и перспективы / Сборник научных трудов X Международной научно-практической конференции (25 – 27 марта 2024 г.). Часть 1. – М.: РГУ им. А.Н. Косыгина, 2024. – 393 с., с. 219-223.

278. Минец В.В., Белицкая О.А. Анализ современных методик проектирования пресс-форм в обувной промышленности // Концепции, теория, методики фундаментальных и прикладных научных исследований в области инклюзивного дизайна и технологий: сборник научных трудов по итогам Международной научно-практической заочной конференции (25-27 марта 2020 г.). Часть 3. – М.: РГУ им. А.Н. Косыгина, 2020. – 170 с., с. 133-137.

279. Минец В.В., Белицкая О.А. Исследования свойств материалов для изготовления экспресс-форм в легкой промышленности // Дизайн, технологии и инновации в текстильной и легкой промышленности (ИННОВАЦИИ-2020): сборник материалов Международной научно-технической конференции. Часть 1. – М.: ФГБОУ ВО «РГУ им. А.Н. Косыгина», 2020. – 271 с., с. 200-203.

280. Минец В.В., Белицкая О.А. 3D-технологии и проектирование экспресс-форм в современном дизайне обуви // Концепции в современном дизайне: Сборник материалов II Всероссийской научной онлайн-конференции с международным участием. Выпуск 2. – М.: РГУ им. А.Н. Косыгина, 2020. – 330 с., с. 167-171.

281. Ильясова А.В., Белицкая О.А. Исследование современного рынка пластиков, используемых для 3D-печати // Концепции, теория, методики

фундаментальных и прикладных научных исследований в области инклюзивного дизайна и технологий: сборник научных трудов по итогам Международной научно-практической заочной конференции (25-27 марта 2020 г.). Часть 1. – М.: РГУ им. А.Н. Косыгина, 2020. – 170 с., с. 36-41.

282. Карасева А.И., Белицкая О.А. Рыбьи кожи. Невостребованная экзотика российской кожевенной промышленности // Дизайн, технологии и инновации в текстильной и легкой промышленности (ИННОВАЦИИ-2018): сборник материалов Международной научно-технической конференции. Часть 1. – М.: ФГБОУ ВО «РГУ им. А.Н. Косыгина», 2018. – 257 с., с.171-175.

283. Косенкова А.В., Белицкая О.А. Анализ отличий восточного менталитета в проекции на бизнес-отношения // Сборник научных трудов «Эргодизайн как инновационная технология проектирования изделий и предметно-пространственной среды: инклюзивный аспект», Часть 1. – М.: РГУ им. А.Н. Косыгина, 2019. – 167 с., с. 53-56.

284. Коновалова О.Б., Минец В.В., Бокова Е.С., Костылева В.В., Белицкая О.А. Полимерные материалы для 3D-печати и возможность их применения в обувном производстве: группа крупнотоннажных полимеров // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. – 2022. – № 2(398). – с. 304-311. – DOI 10.47367/0021-3497_2022_2_304.

285. De Jong, J.P. and E. de Bruijn. 2013. Innovation lessons from 3-D printing. MIT Sloan Management Review. – 54(2): 42-52.

286. Eisenhardt, K.M. and B.N. Tabrizi. 1995. Accelerating adaptive processes. Product innovation in the global computer industry. Administrative Science Quarterly. – 40(1): 84-110.

287. Fernández P. et al. Relationships among functional units and new product performance: The moderating effect of technological turbulence //Technovation. – 2010. – Т. 30. – №. 5-6. – С. 310-321.

288. Mauerhoefer T., Strese S., Brettel M. The impact of information technology on new product development performance //Journal of Product Innovation Management. – 2017. – Т. 34. – №. 6. – С. 719-738.

289. Mellor S., Hao L., Zhang D. Additive manufacturing: A framework for implementation //International journal of production economics. – 2014. – Т. 149. – с. 194-201.
290. Xu F., Wong Y. S., Loh H. T. Toward generic models for comparative evaluation and process selection in rapid prototyping and manufacturing //Journal of manufacturing systems. – 2001. – Т. 19. – №. 5. – с. 283-296.
291. Todd Grim and Associates. Fused Deposition Modelling Technology Evaluation”, Time-Compression Technologies. – Vol. 2. № 3. 2003. P. 1-6.
292. Youssef A., Hollister S. J., Dalton P. D. Additive manufacturing of polymer melts for implantable medical devices and scaffolds //Biofabrication. – 2017. – Т. 9. – №. 1. – C. 012002.
293. Jacobs P.F. Rapid Prototyping & Manufacturing: Fundamentals of Stereolithography; Society of Manufacturing Engineers: Dearborn, MI, USA, 1992; ISBN 0872634256.
294. Ferreira J. C., Mateus A. A numerical and experimental study of fracture in RP stereolithography patterns and ceramic shells for investment casting //Journal of Materials Processing Technology. – 2003. – Т. 134. – №. 1. – с. 135-144.
295. Белицкая О.А. Совершенствование антистатической обуви с применением аддитивных технологий // Костюмология. — 2023. — Т 8. — №4. — URL: <https://kostumologiya.ru/PDF/09TLKL423.pdf>
296. Шкуро А.Е. Технологии и материалы 3D-печати [Электронный ресурс]: учеб. пособие / А.Е. Шкуро, П.С. Кривоногов. – Екатеринбург: Урал. гос. Лесотехн. ун-т, 2017, 100 с.
297. Крупные производители АБС-пластика [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://ru.wikipedia.org/wiki/АБС-пластик>
298. Применение АБС-пластиков производства АО «Пластик» [Электронный ресурс] – Режим доступа: http://oaoplastic.ru/wp-content/uploads/2020/01/ABS_rus.pdf

299. АБС-пластики производства ПАО «Нижнекамскнефтехим» [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.nknh.ru/products/plastics/abs-plastic/>
300. Компании U3Print [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://u3print.com/>
301. Сравнительная таблица Techno [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://u3print.com/articles/u3lab/techno-tablica>
302. ГОСТ 28507-90 Межгосударственный стандарт. Обувь специальная кожаная для защиты от механических воздействий. Общие технические условия. – М: Изд-во стандартов, 1991. – 11 с.
303. ГОСТ 12.4.033-95 Межгосударственный стандарт. Обувь специальная с кожаным верхом для предотвращения скольжения по зажиренным поверхностям. Технические условия. – М: Стандартинформ, 2018. – 12 с.
304. Патент на полезную модель № 204433 U1 Российская Федерация, МПК А43В 13/12. Антистатическая обувь с заземляющими свойствами: № 2020123851: заявл. 17.07.2020: опубл. 24.05.2021 / О.А. Белицкая, О.В. Сироткина; заявитель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный университет им. А.Н. Косыгина».
305. Коновалова О.Б., Минец В.В., Бокова Е.С., Костылева В.В., Белицкая О.А. Полимерные материалы для 3D-печати и возможность их применения в обувном производстве: ассортимент пластмасс инновационной функциональности // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. – 2021. – № 5(395). – с. 262-267. – DOI 10.47367/0021-3497_2021_5_262.
306. Минец В.В., Белицкая О.А. Применение аддитивных технологий при создании коллекций обуви и аксессуаров // Дизайн и технологии. – 2018, № 63 (105). с. 31-36.
307. Минец В.В., Татарчук И.Р., Белицкая О.А., Литвин Е.В. Применение 3D-технологий быстрого прототипирования при изготовлении оснастки обувного производства и апробация формальной модели экспресс-формы для литьевого агрегата // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной

промышленности. – 2022. – № 2(398). – с. 329-333. – DOI 10.47367/0021-3497_2022_2_329.

308. На гигантском заводе «Газпрома» для «Силы Сибири» прогремел взрыв [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://m.lenta.ru/news/2021/10/08/amur/>

309. В Тюмени произошел пожар на Антипинском нефтеперерабатывающем заводе [Электронный ресурс] – Режим доступа: https://m.lenta.ru/news/2022/01/04/npz_fire/

310. Взрыв произошел на нефтяном месторождении Тенгиз в Казахстане, есть погибшие и раненые [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://dailystorm.ru/news/vzryv-proizoshel-na-neftyanom-mestorozhdenii-tengiz-v-kazahstane-est-pogibshie-i-ranenye>

311. Белицкая О.А. Разработка антистатической обуви с расширенной функциональностью // Сборник трудов Международной научно-практической конференции «Современные инновационные технологии в легкой промышленности: проблемы и решения», 19-20 ноября 2021 года. – Бухоро.: «БухМТИ», 187 стр. [Часть 1], с. 10-15.

312. Guo B. Y., Guo J., Yu A. B. Simulation of the electric field in wire-plate type electrostatic precipitators //Journal of Electrostatics. – 2014. – Т. 72. – №. 4. – с. 301-310.

313. Li J. et al. Large eddy simulation of electrostatic effect on particle transport in particle-laden turbulent pipe flows //Journal of Electrostatics. – 2021. – Т. 109. – с. 199-207

314. Морозов, В.А. Моделирование электростатических полей с применением банков математических моделей и численных методов // Известия высших учебных заведений. Электромеханика, 2002, № 3., с. 3-5.

315. Rahou F. et al. Numerical simulation of the continuous operation of a tribo-aero-electrostatic separator for mixed granular solids //Journal of Electrostatics. – 2013. – Т. 71. – №. 5. – С. 867-874.

316. Chowdhury F. et al. Evaluating the electrostatic charge transfer model for particle-particle interactions //Journal of Electrostatics. – 2021. – Т. 112. – с. 5-9.

317. Ansys Fluent. Fluid Simulation Software: Canonsburg. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.ansys.com/products/fluids/ansys-fluent>

318. Platform Product: COMSOL MULTIPHYSICS. Understand. Predict, and Optimize Physics-Based Designs and Processes with COMSOL Multiphysics [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.comsol.com/comsol-multiphysics>

319. Simcenter STAR-CCM+. Engineer innovation with multiphysics computational fluid dynamics (CFD) simulation. Munich. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.plm.automation.siemens.com/global/eii/products/simcenter/STAR-CCM.html>

320. FLOW-3D. Solving the World's Toughest CFD Problems. Santa Fe, 2000. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://wvt-w.flow3d.com/>

321. CHAM. Experts in CFD software and consultancy. Phoenix. London. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.cham.co.uk/phoenics.php>

322. Белицкая О.А. Моделирование электростатических полей вокруг человека с применением кроссплатформенного программного обеспечения // Сборник материалов докладов 55-й Международной научно-технической конференции преподавателей и студентов (27 апреля 2022 г.) – Витебск: УО «ВГТУ», 2022. – 441 с., с. 49-52.

323. Севастьянов, Б.А. Ветвящиеся процессы. - Москва: Наука, 1971. - 436 с.

324. Сканиви Г.И. Физика диэлектриков (Область сильных полей). – М.: Гос. изд-во физ.-матем. лит., 1958. - 907 с.

325. Broadbent S. R., Hammersley J. M. Percolation processes: I. Crystals and mazes //Mathematical proceedings of the Cambridge philosophical society. – Cambridge University Press, 1957. – Т. 53. – №. 3. – с. 629-641.

326. Тарасевич Ю.Ю. Перколяция: теория, приложения, алгоритмы. Учебное пособие. М.: Едиториал УРСС, 2002. – 112 с.

327. Белицкая О.А. Моделирование электростатических полей вокруг человека в обуви и одежде с различной диэлектрической проницаемостью // Вестник Витебского государственного технологического университета. 2024. № 1 (47)., с. 44-52.

328. Белицкая О.А., Хамов И.В. Практическое применение программного комплекса ANSYS для моделирования электростатических полей вокруг человека // Фундаментальные и прикладные научные исследования в области инклюзивного дизайна и технологий: опыт, практика и перспективы / Сборник научных трудов Международной научно-практической конференции (23 – 25 марта 2022 г.). Часть 2. – М.: РГУ им. А.Н. Косыгина, 2022. – 239 с., с. 91-96.

329. Харрис, Т. Теория ветвящихся случайных процессов [Текст] / Пер. с англ. Б. А. Севастьянова и В. П. Чистякова. - Москва: Мир, 1966. - 355 с.

330. Индивидуальный регистратор-индикатор ИРИ-04М. Руководство по эксплуатации БВЕК 550000.001 РЭ [Текст]. — М.: НТМ-Защита, 2008. — 14 с.

331. ГОСТ 31610.0-2019 Взрывоопасные среды. Часть 0. Оборудование. Общие требования. – М: Стандартинформ, 2020. – 129 с.

332. Правила устройства электроустановок (ПУЭ гл. 7.3) [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.elec.ru/library/direction/pue.html>

333. Правила технической эксплуатации электроустановок потребителей (ПТЭЭП гл. 3.4) [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/901839683>

334. Постановление Госгортехнадзора РФ от 20.05.2003 N 33 «Об утверждении правил промышленной безопасности нефтебаз и складов нефтепродуктов» (Зарегистрировано в Минюсте РФ 09.06.2003 N 4666) [Электронный ресурс] – Режим доступа: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_42669

335. Сравнение различных процедур проверки воздействия электростатического разряда. Часть 1 // Электронный журнал «РадиоЛоцман» 2012, 01, - 68 с., с. 15-22

336. Военный стандарт США, MIL-STD-883, метод 3015.9 Классификация чувствительности к электростатическому разряду [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://ru.knowledgr.com/06763409/MILSTD883>

337. Международный стандарт JEDEC JS-001-2012 [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.jedec.org/>

338. ГОСТ 30804.4.2-2013 Совместимость технических средств электромагнитная. Устойчивость к электростатическим разрядам. Требования и методы испытаний. – М: Стандартинформ, 2014. – 51 с.

339. Игнатова К.Л., Белицкая О.А. Оценка накопления ЭСП на теле человека в зависимости от влажности воздуха, конструкций обуви и материалов напольного покрытия // Сборник материалов докладов 56-й Международной научно-технической конференции преподавателей и студентов (19 апреля 2023 г.) – Витебск: УО «ВГТУ», 2023. – 517 с., с. 232-235.

340. Игнатова К.Л., Конарева Ю.С., Белицкая О.А. Использование принципа Парето в оценке измерений показателей электростатического поля // Сборник материалов докладов 55-й Международной научно-технической конференции преподавателей и студентов (27 апреля 2022 г.) – Витебск: УО «ВГТУ», 2022. – 441 с., с. 277-281.

341. Филюнов В.А., Муртазина А.Р., Костылева В.В., Конарева Ю.С. Применение инфографики в статистических методах контроля качества. Фундаментальные и прикладные научные исследования в области инклюзивного дизайна и технологий: опыт, практика и перспективы: сборник научных трудов по итогам Международной научно-практической заочной конференции (24-26 марта 2021 г.). Часть 1. – М.: РГУ им. А.Н. Косыгина, 2021. – 207 с., с. 103-110.

342. Бузов Б.А. Управление качеством продукции. Технический регламент, стандартизация и сертификация: учеб. пособие для вузов/ Б. А. Бузов. – 3-е изд., доп. – М.: Издательский центр «Академия», 2008. -176 с.

343. Белицкая О.А., Сироткина О.В. Оценка динамики накопления электростатического потенциала бытовой и специальной антистатической обуви на

различных напольных покрытиях // Дизайн и технологии, № 70 (112). – Москва: РГУ 2019. -141 с., с. 28-33.

344. Белицкая О.А. Оценка электростатических свойств обуви с помощью индивидуального регистратора искробезопасности // Материалы докладов международной научно-технической конференции «Инновационные технологии в текстильной и легкой промышленности», 26-27 ноября 2014 г. / УО «ВГТУ». - Витебск, 2014. - с. 422-424.

345. Самсонова А.А., Белицкая О.А. Оценка влияния расположения регистратора электростатического поля на теле экспериментатора на уровень напряженности электростатического поля // Дизайн, технологии и инновации в текстильной и легкой промышленности (ИННОВАЦИИ-2015): сборник материалов Международной научно-технической конференции. Часть 1. – М.: ФГБОУ ВПО «МГУДТ», 2015. –223 с., с. 152-154.

346. Белицкая О.А. Интегральный метод оценки антистатических свойств обуви // Современные задачи инженерных наук: сборник научных трудов Международного научно-технического симпозиума «Современные инженерные проблемы промышленности товаров народного потребления» Международного научно-технического Форума «Первые международные Косыгинские чтения» (11-12 октября 2017 года). Том 1. – М.: ФГБОУ ВО «РГУ им. А.Н. Косыгина», 2017. – 353 с., с. 118-121.

347. Галимнуров, А.Ф. Структурные особенности жизненного цикла инноваций / А.Ф. Галимнуров // Экономика и управление: научно-практический журнал. – 2023. – № 5(173). – С. 32-38. – DOI 10.34773/EU.2023.5.6.

348. Иржак, В. И. Структура и свойства полимерных материалов / В. И. Иржак. — 3-е изд., стер. — Санкт-Петербург: Лань, 2023. — 168 с.

349. Сироткина О.В. Разработка методики оценки антистатической безопасности специальной обуви / О. В. Сироткина, О. А. Белицкая // Конкурс научно-исследовательских работ, Москва, 08-11 декабря 2020 года. – Москва: Ассоциация разработчиков, изготовителей и поставщиков средств индивидуальной защиты, 2020. – с. 107-109.

350. Мендалиева Ф.А., Белицкая О.А. Практическое применение программного пакета ORIGIN для представления результатов исследования антистатических показателей обуви // Фундаментальные и прикладные научные исследования в области инклюзивного дизайна и технологий: опыт, практика и перспективы / Сборник научных трудов Международной научно-практической конференции (23 – 25 марта 2022 г.). Часть 2. – М.: РГУ им. А.Н. Косыгина, 2022. – 239 с., с. 180-185.

351. ГОСТ 23251-2023 Обувь. Термины и определения. – М: ФГБУ «Институт стандартизации», 2023. – 20 с.

352. Кроткова Р.Д. Измерение электризуемости обувных материалов. Экспресс-информация. – М.: ЦНИИИТЭИЛП, 1972. – 8 с.

353. Патент «Устройство для измерения электростатического заряда при трении» ((11) № 33123 3 (51) G 01 R 29/12, от 15.12.1982) / Стоянов С.Д., Иванова Р.Г., Атанасова К.Д., Димов К.Д.

354. Патент «Устройство для измерения электростатического заряда при трении», ((19) SU (11) № 1500953 A1, (51) 4 G 01 R 29/12, от 15.08.1989) / Гараев Ф.М, Рыжанушкин О.В., Обыденнова Е.В.

355. Таточенко И.М. Исследование влияния сырьевого состава пакета одежды на его электростатические свойства / Дисс... канд. тех. наук – М.: 2003. – 184 с.

356. Бирюкова М.Ф., Леденева И.Н., Костригина Ю.А., Белицкая О.А. Оценка электростатических свойств обувных материалов динамическим методом измерения // Кожевенно-обувная промышленность. – 2004. – №2. – с. 46-47.

357. Бирюкова М.Ф., Леденева И.Н., Белицкая О.А. Метод динамической оценки электризуемости обувных материалов // Вестник Московского государственного университета дизайна и технологии. Выпуск №1 (43). – М.: ИИЦ МГУДТ, 2003. – с. 117-120.

358. Измеритель напряженности электростатического поля СТ-01. Руководство по эксплуатации МГФК 410000.001РЭ. ООО «НТМ-ЗАЩИТА», 2003. – 23 с.

359. Белицкая О.А., Леденева И.Н. Метод оценки времени релаксации электростатического заряда на обувных материалах // Сборник статей «Факторы, влияющие на качество одежды и обуви» под ред. Павловой М. – Радом, 2004. – с. 191-194.

360. Патент № 2307366 С1 Российская Федерация, МПК G01R 29/12. устройство для измерения поверхностной плотности электростатического заряда при трении: № 2006112283/28: заявл. 14.04.2006: опубл. 27.09.2007 / О. А. Белицкая, И. Н. Леденева; заявитель Московский государственный университет дизайна и технологии (МГУДТ).

361. Дунаевская Т.Н. и др. Размерная технология населения с основами анатомии и морфологии человека. – М.: Легпромбытиздат, 1980. – 284 с.

362. Белицкая О.А. Оценка электростатических свойств стелечных материалов // «Дизайн и технологии», № 59 (101). – Москва: РГУ 2017. -127 с., с. 36-42.

363. Зарицкий Б.П., Леденева И.Н., Белицкая О.А. Оценка электростатических свойств обуви с верхом из войлока с подкладкой из мембранных материалов // Известия высших учебных заведений. Технология легкой промышленности, том 29, № 3. – СПб.: 2015. – с. 113-116.

364. Белицкая О.А., Гасанов М.Э., Ерохина Е.А., Карпухин А.А. Оценка электростатических свойств материалов низа обуви // Дизайн и технологии, № 62(104). – Москва: РГУ им. А.Н. Косыгина, 2017. -128 с., с. 35-40.

365. Belitskaya, O. A. An Installation for Studying the Triboelectric Properties of Materials in a Wide Temperature Range / O. A. Belitskaya, S. O. Arestov, A. A. Mavlyutov // Polymer Science, Series D. – 2024. – Vol. 17, No. 3. – P. 771-775. – DOI 10.1134/S1995421224701338.

366. Денисов В.И. Прецизионные приборы камертонного типа. - М.: Машиностроение, 1985 г., 112 с.

367. Макс Ж. Методы и техника обработки сигналов при физических измерениях, М.: Мир, 1983 г., т.1, 312 с.

368. Сергиенко А.Б. Цифровая обработка сигналов. - СПб.: Питер, 2003 г., 604 с.

369. Коновалова О.Б. Параметрическое проектирование материалов с реконфигурируемой трехмерной структурой в производстве товаров народного потребления: дисс. ... канд. техн. наук: 2.6.16 / Коновалова Ольга Борисовна – М., 2023. – 248 с.

370. Белицкая О.А. О влиянии отрицательных температур на электростатические параметры специальных изделий // Сборник научных статей и воспоминаний «Памяти В.А. Фукина посвящается». Часть 1. – М.: МГУДТ, 2014. – 219 с., с. 81-84.

371. Моряков В.Я., Майорова Н.З. Электризуемость подошвенных материалов при трении о различные поверхности// Совершенствование конструкции и технологии изделий из кожи с использованием элементов автоматизированного проектирования: Сборник научных трудов МТИЛП - М.: ЦНИТЭИЛегпром, 1991., с. 109-111.

372. Белицкая О.А., Фокина А.А., Рыкова Е.С., Максимова И.А., Конарева Ю.С. Влияние климатических параметров на трибоэлектрические свойства материалов специальной обуви // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. – 2021. – № 5(395). – с. 48-53. – DOI 10.47367/0021-3497_2021_5_48.

373. Белицкая О.А. Фокина А.А. Изучение трибоэлектрических свойств материалов для верха специальной обуви // Дизайн, технологии и инновации в текстильной и легкой промышленности (ИННОВАЦИИ-2020): сборник материалов Международной научно-технической конференции. Часть 1. – М.: ФГБОУ ВО «РГУ им. А.Н. Косыгина», 2020. – 271 с., с. 126-129.

374. Belitskaya O.A., Fokina A.A., Belgorodskiy V.S., Sokolovsky A.R., Panferova E.G. Integral assessment of antistatic properties of materials used in individual safety gear // Materials Science Forum. 2023. T. 1085. C. 101-106. DOI: 10.4028/p-jt439u

375. Shuaihang PAN, Zhinan ZHANG. Fundamental theories and basic principles of triboelectric effect: A Review // Friction 2019, 07(01), 2-17.

376. F. Chowdhury, M. Ray, A. Passalacqua, P. Mehrani, A. Sowinski Evaluating the electrostatic charge transfer model for particle-particle interactions // Journal of Electrostatics. – 2021. – Т. 112. – с. 103603.

377. Белицкая О.А., Игнатова К.Л., Костылева В.В., Фокина А.А., Рыкова Е.С. Оценка трибоэлектрических свойств системы «обувь - опорная поверхность» // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. – 2024. – № 5(413). – с. 64-70. – DOI 10.47367/0021-3497_2024_5_64.

378. Симачёв Д. Н., Леденева И. Н., Белицкая О.А. Оценка безопасности обуви из валяльно-войлочных материалов // «Дизайн и технологии», № 47 (89). - Москва: МГУДТ 2015. -128 с., с. 36-40.

379. Ивахников А.М. Белицкая О.А. Разработка базы данных антистатических свойств обуви и интеграция в 1С: актуальность и основные принципы // Фундаментальные и прикладные научные исследования в области инклюзивного дизайна и технологий: опыт, практика и перспективы / Сборник научных трудов X Международной научно-практической конференции (25 – 27 марта 2024 г.). Часть 2. – М.: РГУ им. А.Н. Косыгина, 2024. – 391 с., 67-70.

380. Рыкова Е.С., Фокина А.А., Белицкая О.А., Медведева О.А. Альтернативные материалы в производстве обуви и аксессуаров // Материалы докладов международной научно-технической конференции «Инновации в текстиле, одежде, обуви (ICTAI—2023)» (9–10 ноября 2023), Витебск, 2024. – 150 с., с. 59-72.

381. Рыкова Е.С., Федосеева Е.В., Белицкая О.А., Костылева В.В., Фокина А.А. Концепция адресного проектирования изделий для женщин элегантного возраста // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. 2024. № 4 (412). С. 157-166 DOI 10.47367/0021-3497_2024_4_157

382. ГОСТ 12.1.018-93 Система стандартов безопасности труда. Пожаровзрывобезопасность статического электричества. Общие требования. – Минск: Изд-во стандартов, 1994. – 7 с.

383. Белицкая О.А., Севостьянов П.А. Математическое моделирование динамики накопления и релаксации электростатических зарядов на поверхности тела человека в зависимости от типа обуви // Костюмология. — 2024. — Т 9. — №4. — URL: <https://kostumologiya.ru/PDF/15TLKL424.pdf>

384. Сироткина О.В., Белицкая О.А., Калинин М.В. Влияние видов экзотических животных на микроструктуру их кожного покрова // Дизайн, технологии и инновации в текстильной и легкой промышленности (ИННОВАЦИИ-2016): сборник материалов Международной научно-технической конференции. Часть 1. – М.: ФГБОУ ВПО «МГУДТ», 2016. – 311 с., с. 237-239.

385. Сироткина О.В., Белицкая О.А., Конарева Ю.С. Классификация кож экзотических животных, применяемых для производства обуви и кожгалантереи // «Дизайн и технологии», № 53(95). – Москва: МГУДТ 2016. -117 с., с. 71-81.

386. Леденева И.Н., Сергеева Ю.М., Белицкая О.А. Предпосылки разработки метода 3D-принтирования для повышения эксплуатационных характеристик войлочной обуви // Технологии, дизайн, наука, образование в контексте инклюзии: Сборник научных трудов. Часть 1. – М.: РГУ им. А.Н. Косыгина, 2018. – 253 с., с. 84-87.

387. Зайончковский А.Д. Некоторые вопросы гигиенических свойств и структуры искусственной кожи для верха обуви [Текст]: (Цикл лекций) / Проф. А. Д. Зайончковский; Всесоюз. заоч. ин-т текстильной и легкой пром-сти "ВЗИ ГЛП". Фак. усовершенствования знаний инж. техн. работников легкой пром-сти. - Москва: Лег. индустрия, 1968. - 108 с.: черт.; 21 см.

388. Швецова Т. П. Технология обуви. Учебник для сред. спец. учеб. заведений легкой пром-сти. М.: Легкая и пищевая пром-сть, 1983. - 296 с.

389. Джураева М. И. Требования, предъявляемые к свойствам обуви, в зависимости от ее конкретного назначения и условий эксплуатации // Вестник науки. 2022. №9 (54), с. 58-62.

390. Hoagland H. Dielectric and electrical hazard shoes. Occupational Health & Safety (Waco, Tex.) 2011; 80(4): 36-38.

391. Godlewski JR, Purdy GT, Blattner CJ. Electrical Resistance of Work Shoes. IEEE Transmission and Distribution Conference 1999; 2: 523 – 525.
392. Антистатические сандалии на липучке FC04 PORTWEST [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.elkomplect.ru>
393. Антистатические сабо с перфорацией FC-03 PORTWEST [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.elkomplect.ru>
394. Антистатические туфли REFLEXOR 02-0035710 [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://abeba.com>
395. Полуботинки мужские «Атлетик Антистат» с внутренним защитным носком из композитного материала [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://elita-spec.ru/>
396. Антистатические ботинки FOOD TRAX 02-0012874 [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://abeba.com/>
397. Антистатические сапоги CLEAN ROOM 02-0003620 [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://abeba.com/>
398. Антистатические одноразовые бахилы с токопроводящей лентой [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.lamsystems-lto.ru>
399. Антистатическая противоусталостная стелька АВЕБА 3553 [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://electrorashod.ru>
400. Ремешок заземления для обуви на пятку Vermason 248500 [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://esd-line.ru>
401. ESD носки 8201 [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://esd.equipment>
402. Антистатическая стелька Abeba 2590.3577 [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.protehnology.ru>
403. Сабо Abeba 2590.4045 [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.protehnology.ru>
404. Максимов Б.К., Обух А.А. Статическое электричество в промышленности и защита от него. – М.: Энергия, 1978. – 80 с.

405. ГОСТ 8541-2014 Изделия чулочно-носочные, вырабатываемые на круглочулочных автоматах. Общие технические условия. – М: Стандартинформ, 2015. – 51 с.

406. ГОСТ 11373-88 Обувь. Размеры. – М: ИПК Издательство стандартов, 2003. – 8 с.

407. Захарченко В.В., Журавлев В.С., Очков Ю.Д. Правила защиты от статического электричества в производствах химической, нефтехимической и нефтеперерабатывающей промышленности //Министерство нефтеперерабатывающей и нефтехимической промышленности СССР. М., «Химия», 1973 г., с. 64

408. Ивахников А.М., Белицкая О.А. Разработка интегрированной базы данных антистатических свойств обуви // Известия высших учебных заведений. Технология легкой промышленности. – 2024. – Т. 69, № 5. – с. 89-93. – DOI 10.46418/0021-3489_2024_69_05_15.

409. Измеритель электростатического потенциала ИЭСП-6. Техническое описание. Инструкция по эксплуатации КС.1597.ЭМС.ТО. Научно-производственный центр ЭМС, 1997. – 11 с.

410. Измеритель напряженности электростатического поля ИЭСП-5Ц. Руководство по эксплуатации КС.1495.ЭМС.ТО. Научно-производственный центр ЭМС, 1996. – 11 с.

411. Приборы санитарного и экологического контроля. Каталог компании «Октава +», 2004. – 78 с.

412. Кулин Е.Т. Электромагнитное поле человека и его роль в жизнедеятельности организма //Мед. новости. – 1996. – №. 10. – с. 34-38.

413. Евтеева Н.Г., Дормидонтова О.В., Чурсин В.И., Белицкая О.А. Применение релаксационной спектроскопии для оптимизации процесса зольения с использованием электроактивированных растворов // «Дизайн и технологии» – 2021. – № 85-86(127-128). – с. 96-103.

414. Hu Shu, Chen Xiangchao, Li Peng, et al. Highly comfortable PVC antistatic shoes with stable resistance // Cleanroom and Air-Conditioning Technol. - 2017 (03). – p. 106-110.
415. Hu Shu, Chen Xiangchao, Li Peng, et al. On the peeling problem and countermeasures of PVC antistatic cold adhesion shoes // Cleanroom and Air Conditioning Technol. – 2018(03). – p. 86-88.
416. Zhang Yunpeng, Liu Quanzhen, Sun Lifu, et al. Anti-static shoes for petrochemical industry // China Personal Protective Equipment. – 2014(04). – p. 51-53. DOI: 10.16102/j.cnki.cppe.2014.04.028.
417. Wang Hongjia. Selection and application of antistatic materials in electrostatic hazardous places // New Industrialization. – 2019, 9(03). – p. 95-97. DOI: 10.19335/j.cnki.2095-6649.2019.03.022.
418. Yan Jiabao. Static electricity hazards and occupational safety // Industrial Safety and Dust Control. – 1998(09). – p. 15-17.
419. Chen Xiaowei. Effect of the amount of carbon conductive material on the antistatic performance of carboxynitrile latex gloves // Rubber Industry. - 2024, 71(01). – p. 40-46.
420. Wang Zhenting, Yin Jiyong, Li Yang, et al. Preparation and properties of graphene-based antistatic materials // Journal of Heilongjiang University of Science and Technology. – 2017, 27(04). – p. 429-432.
421. Jia Yongchao. Analysis of electrical performance quality and recommendation for the use of antistatic shoes // Western Leather. – 2022, 44(15). – p. 17-20.
422. Баранов, А. В. Графен и его применение / А. В. Баранов // Перспективные материалы и высокоэффективные процессы обработки: сборник материалов II Всероссийской молодежной конференции, Саратов, 23–24 мая 2023 года. – Саратов: Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А., 2023. – с. 13-15.
423. АО «ПТК «МОДЕРАМ» [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://moderam.ru/moderam/o-kompanii/istoriya.html>

424. Антистатическая обувь [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://moderam.ru/tehnologii/antistaticheskaya-obuv.html>

425. Шашкова, А.А. Жизненный цикл инновации в современной экономике / А.А. Шашкова, С.В. Орехова // Нормирование и оплата труда в строительстве. – 2019. – № 5. – с. 35-38.

426. Голиченко, О.Г. Жизненный цикл основного продукта как индикатор инновационного развития предприятий / О.Г. Голиченко, А.Б. Попов // Инновации. – 2021. – № 3(269). – С. 51-59. – DOI 10.26310/2071-3010.2021.269.3.006.

427. Галимнуров, А.Ф. Структурно-стадийная концепция жизненного цикла инноваций / А.Ф. Галимнуров, Т.Б. Лейберт, Л.С. Валинурова // Инновации и инвестиции. – 2023. – № 10. – с. 6-10.

428. Челноков, А. А. Охрана труда: учебник / А. А. Челноков, И. Н. Жмыхов, В. Н. Цап. — 2-е изд., испр. и доп. — Минск: Вышэйшая школа, 2013. — 655 с. — ISBN 978-985-06-2088-0. — Текст: электронный // Лань: электронно-библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/65279>

429. Буданова, И. Основы электростатического разряда / И. Буданова // Технологии в электронной промышленности. – 2021. – № 7(131). – с. 56-59

430. Пожарная безопасность электроустановок: учеб. пособие / В.К. Грунин, П.В. Рысев, В.К. Федоров, – Омск: Изд-во ОмГТУ, 2013. – 139 с.

Приложение А

Анкета ФГБОУ ВО «РГУ им. А.Н. Косыгина»

ФГБОУ ВО «РГУ им. А.Н. Косыгина» проводит исследование с целью определения критериев выбора рабочей обуви Вашим предприятием. Потратьте, пожалуйста, несколько минут своего времени на заполнение следующей анкеты:

1. Ваш возраст:

☐ 18-23 ☐ 24-28 ☐ 29-33 ☐ 34-38 ☐ 39-43 ☐ 44-48 ☐ 49-53 ☐ 54 и более

2. Укажите предприятие, на котором Вы работаете:

Ответ: _____

3. Укажите занимаемую Вами должность:

- ☐ директор (ген. директор)
☐ руководитель структурного подразделения
☐ менеджер по закупкам
☐ начальник отдела материально-технического снабжения
☐ другое _____

4. Использует ли Ваше предприятие конкурентную форму отбора предложений на поставку товаров (систему тендеров):

- ☐ да
☐ нет

5. Главные критерии выбора при закупке рабочей обуви на Вашем предприятии:

- ☐ цена
☐ известность торговой марки
☐ качество
☐ отечественный производитель
☐ соотв. нормам выдачи СИЗ по отраслям производства
☐ соотв. требованиям предъявляемых к условиям вашего предприятия

6. Чем руководствуется Ваше предприятие, когда составляет требования к закупаемой обуви:

- ☐ результатами СОУТ (специальная оценка условий труда) рабочих мест
☐ стандартными НТД (нормативно-техническими документами)
☐ другое _____

7. По какой цене Вы приобрели последнюю партию рабочей обуви:

	До 1000 руб.	1001-2000 руб.	2001-3000 руб.	3001-4000 руб.	Более 4000 руб.
Влагостойкая рабочая обувь (резиновая)					
Демисезонная рабочая обувь					
Утепленная рабочая обувь					

8. Что обычно является поводом для новой закупки рабочей обуви?

- ☐ непригодное состояние существующей рабочей обуви
☐ по мере жалоб работников о состоянии рабочей обуви
☐ один раз в полгода (для резиновой обуви)
☐ один раз в год

- ☐ один раз в два года
- ☐ один раз в три года

9. При покупке рабочей обуви, какими защитными свойствами она должна обладать? (возможно три варианта ответа)

- ☐ защита от высоких температур и пламени
- ☐ защита от нефти, нефтепродуктов, масел, жиров
- ☐ защита от низких температур (холода)
- ☐ защита от общих производственных загрязнений
- ☐ защита от открытого огня
- ☐ защита от проколов
- ☐ защита от статического электричества
- ☐ от влаги
- ☐ от механических воздействий
- ☐ другое _____

10. Обувь, каких торговых марок закупает Ваше предприятие?

- ☐ Модерам ☐ Восток-Сервис ☐ Техноавия ☐ Авангард ☐ Эксперт спеодежда
- ☐ Энергоконтракт ☐ Спецобъединение Юго-Запад ☐ Парижская Коммуна
- ☐ Союзспеодежда ☐ СпецПром ☐ РАТ ☐ Томский завод резиновой обуви
- ☐ Аспект ☐ Талан ☐ HECKEL ☐ M&G ☐ WORKLOAD ☐ НОКИАН ☐ РАНГ
- ☐ ТРЕЙЛ ПЛЮС ☐ ЭТНА ☐ Sievi ☐ Delta Plus ☐ SCENDA
- ☐ другое _____

11. Почему Вы закупаете именно данную(-ые) торговую(-ые) марку(-и)? (возможно три варианта ответа)

- ☐ приемлемое соотношение цены и качества
- ☐ многолетние доверительные отношения
- ☐ оптовые скидки
- ☐ соответствие требованиям СИЗ
- ☐ наличие сертификата СТ1
- ☐ при сотрудничестве с отечественными производителями ФСС возмещают стоимость затрат на СИЗ
- ☐ другое _____

12. Соответствует ли закупленная рабочая обувь заявленным требованиям?

- ☐ да ☐ нет

Если нет, то в чем не соответствует _____

13. Как Вы считаете, какие защитные свойства необходимо добавить производителям рабочей обуви?

- ☐ подошва из износостойкого и масло-бензостойкого полиуретана
- ☐ антипрокольная стелька
- ☐ супинатор из эластичных материалов
- ☐ антискользящая подошва
- ☐ нитриловая подошва
- ☐ тепло-жаростойкие (термостойкими) нити заготовки верха обуви
- ☐ другое _____

14. Используется ли на Вашем производстве антистатическая обувь?

- ☐ да ☐ нет

15. Если да, то каких торговых марок Ваше предприятие закупает антистатическую обувь?

- ☐ ООО «Центр профессиональной обуви» (ЦПО)
- ☐ ООО «Лаборатория Технологической Одежды» (LAMSYSTEMS)
- ☐ SIEVI (Финляндия)
- ☐ COFRA (Италия)
- ☐ GIASCO (Италия)
- ☐ PERF (Италия)
- ☐ RED WING (США)
- ☐ DUNLOP (Нидерланды)
- ☐ ABEBA (Германия)
- ☐ другое _____

16. Как часто на Вашем производстве производят замену антистатической обуви?

- ☐ непригодное состояние существующей рабочей обуви
- ☐ по мере жалоб работников о состоянии рабочей обуви
- ☐ один раз в год
- ☐ один раз в два года
- ☐ один раз в три года
- ☐ другое _____

Спасибо Вам за ответы!

Приложение Б

Сведения об исследованных материалах, использованных в работе

Табл. Б1. Характеристики образцов натуральных кож

№ образца	Торговая марка	Вид кожи	Отделка	Толщина, мм	Поверхностная плотность, г/м ²
1	Наполи	полукожник	без отделки	1,1	700
2	Анил	полукожник	анилиновая	1,3	920
3	Анилин	полукожник	анилиновая	1,5	950
4	Джакар	полукожник	анилиновая	1,7	1600
5	Тула-Т	полукожник	полуанилиновая	1,3	790
6	Корсика	полукожник	с использованием полировальных грунтов	1,3	670
7	Фиеста	полукожник	эмульсионное покрытие	1,1	860
8	—	спилкок полукожника	дискретное полимерное покрытие	1,2	1000
9	—	спилкок полукожника	дискретное полимерное покрытие	1,5	1100
10	—	спилкок полукожника	дискретное полимерное покрытие	1,7	1200

Табл. Б2. Характеристики образцов искусственных кож

№ образца	Покрытие	Основа	Толщина, мм	Поверхностная плотность, г/м ²
11	полиуретановое	нетканая	1,1	400
12	лаковое	нетканая	1,3	680
13	полиуретановое	трикотажная	1,1	480
14	поливинилхлоридное	трикотажная	1,3	270
15	без покрытия, (искусственный нубук)	нет	2,2	550

Табл. Б3. Состав образцов исследуемого войлока

№ образца	Войлок	Нормативный документ (ГОСТ, ТУ)	Состав, %	Толщина, мм	Поверхностная плотность, г/м ²
1	2	3	4	5	6
16	технический тонкошерстный	ГОСТ 288-72	Шерсть натуральная тонкая не ниже 60 качества - 30 Шерсть натуральная полутонкая - 20 Шерсть натуральная полугрубая - 25 Очес гребенной и шерсть овчинная меховая - 25	3,25	270
17	тонкошерстный для электрооборудования	ГОСТ 11025-78	Шерсть натуральная тонкая - 60 Шерсть овчинная меховая тонкая I, II длины и очес гребенной - 25 Шерсть натуральная полутонкая - 15	3,35	280

1	2	3	4	5	6
18	тонкошерстный для радиоэлектронной промышленности	ТУ 8161-006- 00304488-99	Топс лента из тонкой, полугрубой шерсти - 70 Шерсть овечья натуральная мериносовая не ниже 70 качества - 30	1,85	300
19	тонкошерстный для радиоэлектронной промышленности	ТУ 8161-006- 00304488-99	Топс лента из тонкой, полугрубой шерсти - 70 Шерсть овечья натуральная мериносовая не ниже 70 качества - 30	2,95	350
20	технический полугрубошерстн ый для прокладок марки «А»	ГОСТ 6308-71	Шерсть овечья натуральная полугрубая осенняя - 33 Очес гребенной полугрубый - 35 Шерсть овечья натуральная полугрубая весенняя – 15 Шерсть восстановленная - 12 Обраты своего производства в очищенном виде - 5	3,52	580
21	шорный подхомутный	ТУ 17-07-02-89	Шерсть овечья натуральная грубая осенняя - 25 Шерсть овечья натуральная грубая весенняя - 25 Шерсть овчинная меховая - 25 Штапельное волокно - 5 Шерсть восстановленная - 10 Обраты своего производства в очищенном виде - 10	2,95	420
22	седельный	ТУ 17-07-02-89	Шерсть овечья натуральная полугрубая осенняя - 55 Очес гребенной полугрубый - 20 Шерсть овечья натуральная полугрубая весенняя - 10 Шерсть овчинная меховая - 5	3,15	660

Табл. Б4. Характеристики образцов натурального меха

№ образца	Вид меха	Толщина, мм	Поверхностная плотность, г/м ²
23	овчина натуральная	2,80	1600
24	овчина натуральная, дублированная кожей	3,02	2000

Табл. Б5. Характеристики образцов искусственного меха

№ образца	Материал	Основа	Толщина, мм	Поверхностная плотность, г/м ²
25	полиакрилонитрил (ПАН) 60 %, полиэстер (ПЭ) 40 %	трикотажная	1,9	440
26	полиэстер (ПЭ) 100 %	трикотажная	1,5	370
27	полиакрилонитрил (ПАН) 100 %	трикотажная	3,5	650

Табл. Б6. Характеристики образцов текстильных подкладок

№ образца	Материал	Переплетение	Толщина, мм	Поверхностная плотность, г/м ²
28	хлопок 100 %	полотняное	0,4	170
29	лен 100 %	репсовое	0,7	360
30	шерсть 40 %, вискоза 60 %	саржевое	0,7	540
31	полиамид (ПА) 100 %	саржевое	1,2	230
32	двухслойный материал: полиамид 100 %, хлопок 100%	саржевое	2,2	470
33	полиакрилонитрил (ПАН) 100%	саржевое	0,9	200
34	полиэстер (ПЭ) 100%	полотняное	0,5	160

Табл. Б7. Характеристики образцов мембранных материалов

№ образца	Материал	Толщина, мм	Поверхностная плотность, г/м ²	Паропроницаемость, мг/см ² *ч
35	35% поролон 65% полиэфир	3,5	290	72,5
36	100% полиуретан	0,7–0,8	328	13,5
37	94% полиамид 6% полиэфир	1,2	306	1,9
38	50% полиуретан 50% полиэфир	0,3–0,4	328	1,9

Табл. Б8. Характеристики образцов внутренних и промежуточных деталей низа

№ образца	Материал	Толщина, мм	Поверхностная плотность, г/м ²
39	вспененный материал на основе латекса	2,8	380
40	вспененный материал на основе латекса	1,8	280
41	натуральная подкладочная кожа	0,6	450
42	нетканый стелечный материал (Drysole®)	2,2	560
43	вспененный материал (Arneflex®)	4,0	670
44	вспененный материал (Arneflex®)	3,0	620
45	нетканый материал (ПЭ 100%)	3,6	480
46	тканый материал (100% хлопок) на клеевой основе	0,5	220

Табл. Б9. Характеристики образцов для испытаний в камере тепла-холода ТЭК 50/60

№ образца	Материал	Толщина, мм
47	юфть	2,2
48	спилок яловый	1,0
49	нетканый материал «Cambrelle» на поролоне	1,1
50	нитроискожа-Т	1,4
51	бязь термопластическая	0,6

Приложение В

Информационная база электростатических характеристик исследованных образцов материалов обуви

Табл. В1. Электростатические характеристики натуральных кож (натираемая поверхность)

№ образца	Заряд	Напряженность электростатического поля E, кВ/м		Поверхностная плотность заряда, $\sigma \times 10^{-9}$ Кл/м ²		Ток, $I_{BX} \times 10^{-9}$ А/м ²		Постоянная времени релаксации τ , с
		Натирающие поверхности (ткани) *)						
		х/б	смесо- вая	х/б	смесовая	х/б	смесовая	
1	–	0,19	0,14	1,68	1,24	0,840	0,620	менее 2
2	–	0,58	0,34	5,13	3,00	0,203	0,119	25,3
3	–	0,36	0,28	3,19	2,48	1,595	1,240	менее 2
4	–	0,48	0,78	4,25	6,90	0,452	0,734	9,4
5	–	0,34	0,48	3,00	4,25	1,500	2,125	менее 2
6	–	0,35	0,30	3,10	2,66	0,114	0,0978	27,2
7	–	0,36	0,19	3,19	1,68	1,595	0,840	менее 2
8	+	0,77	1,53	6,81	13,54	1,0015	1,991	6,8
9	+	0,73	0,93	6,46	8,23	1,076	1,372	6,0
10	+	1,49	2,69	13,19	23,81	0,725	1,308	18,2

*) здесь и в последующих таблицах В2-В7

х/б - хлопчатобумажная ткань - состав: х/б – 100%

смесовая ткань – состав: х/б – 30%, ПА – 45%, ПАН – 25%

Табл. В2. Электростатические характеристики искусственных кож (натираемая поверхность)

№ образца	Заряд	Напряженность электростатическо го поля E, кВ/м		Поверхностная плотность заряда, $\sigma \times 10^{-9}$ Кл/м ²		Ток, $I_{ВХ} \times 10^{-9}$ А/м ²		Постоянная времени релаксации τ , с
		Натирающие поверхности (ткани)						
		х/б	смесо- вая	х/б	смесовая	х/б	смесо- вая	
11	—	5,70	1,21	50,45	10,71	1,716	0,364	29,4
12	—	1,39	0,84	12,30	7,43	2,050	1,238	6,0
13	—	2,44	1,90	21,59	16,82	2,297	1,789	9,4
14	—	0,42	0,69	3,72	6,11	1,860	3,055	менее 2
15	—	2,19	1,69	19,38	14,96	0,754	0,582	25,7

Табл. В3. Электростатические свойства образцов войлока (натираемая поверхность)

№ образца	Заряд	Напряженность электростатического поля E, кВ/м		Поверхностная плотность заряда, $\sigma \times 10^{-9}$ Кл/м ²		Ток, $I_{ВХ} \times 10^{-9}$ А/м ²		Постоянная времени релаксации τ , мин
		Натирающие поверхности (ткани)						
		х/б	смесо- вая	х/б	смесовая	х/б	смесо- вая	
1	2	3	4	5	6	7	8	9
16	+	7,31	12,10	64,69	107,09	0,123	0,203	8,80
17	+	18,00	12,00	159,30	106,20	0,066	0,044	40,20
18	+	9,50	22,40	84,08	198,24	0,226	0,533	6,20

1	2	3	4	5	6	7	8	9
19	+	15,50	37,00	137,18	327,45	0,653	1,559	3,50
20	+	4,67	17,70	41,33	156,65	0,0765	0,290	9,00
21	+	5,21	19,70	46,11	174,35	0,0569	0,215	13,50
22	+	6,43	31,10	56,91	275,24	0,0536	0,259	17,70

Табл. В4. Электростатические характеристики натурального меха (натираемая поверхность)

№ образца	Заряд	Напряженность электростатического поля E, кВ/м		Поверхностная плотность заряда, $\sigma \times 10^{-9}$ Кл/м ²		Ток, $I_{ВХ} \times 10^{-9}$ А/м ²		Постоянная времени релаксации τ , мин
		Натирающие поверхности (ткани)						
		х/б	смесовая	х/б	смесовая	х/б	смесовая	
23	+	46,7	126,0	413,3	1115,1	4,305	11,615	1,6
24	+	10,0	54,5	88,5	482,3	1,134	6,183	1,3

Табл. В5. Электростатические характеристики искусственного меха (натираемая поверхность)

№ образца	Заряд	Напряженность электростатического поля E, кВ/м		Поверхностная плотность заряда, $\sigma \times 10^{-9}$ Кл/м ²		Ток, $I_{BX} \times 10^{-9}$ А/м ²		Постоянная времени релаксации τ , мин
		Натирающие поверхности (ткани)						
		х/б	смесовая	х/б	смесовая	х/б	смесовая	
25	—	23,0	11,3	203,6	100,0	0,706	0,347	4,8
26	—	55,9	45,8	494,7	405,3	0,485	0,397	17
27	—	25.6	19.0	226.6	168.5	0.839	0.624	4.5

Табл. В6. Электростатические свойства текстильных подкладок (натираемая поверхность)

№ образца	Заряд	Напряженность электростатического поля, кВ/м		Поверхностная плотность заряда, $\sigma \times 10^{-9}$ Кл/м ²		Ток, $I_{\text{ВХ}} \times 10^{-9}$ А/м ²		Постоянная времени релаксации τ , мин
		Натирающие поверхности (ткани)						
		х/б	смесо- вая	х/б	смесовая	х/б	смесо- вая	
28	–	1,49	2,69	13,19	23,81	6,595	11,905	менее 0,03
29	+	1,37	0,95	12,12	8,41	6,060	4,205	менее 0,03
30	+	2,57	19,00	22,74	168,15	0,1403	1,037	2,7
31	+	22,90	32,40	202,67	286,74	0,275	0,389	12,3
32	–	33,50	21,50	296,48	190,28	0,249	0,1601	19,8
33	–	15,50	7,47	137,18	66,11	0,152	0,0735	15,0
34	–	2,60	4,75	23,01	42,04	0,00996	0,0182	38,5

Табл. В7. Электростатические характеристики мембранных материалов (натираемая поверхность)

№ образца	Заряд	Напряженность электростатического поля, кВ/м	Поверхностная плотность заряда, $\sigma \times 10^{-9}$ Кл/м ²		Ток, $I_{BX} \times 10^{-9}$ А/м ²		Постоянная времени релаксации τ , с	
		Натирающие поверхности (ткани)						
		х/б	смесовая	х/б	смесовая	х/б		смесовая
35	+	0,52	0,53	4,6	4,69	2,30	2,35	менее 2
36	+	0,6	0,1	5,31	0,53	2,66	0,27	менее 2
37	+	0,2	0,6	1,77	5,31	0,89	2,66	менее 2
38	+	0,1	0,25	0,89	2,21	0,44	1,11	менее 2

Табл. В8. Электростатические характеристики внутренних и промежуточных деталей низа (натираемая поверхность)

№ образца	Заряд	Напряженность электростатического поля, кВ/м			Поверхностная плотность заряда, $\sigma \times 10^{-9}$ Кл/м ²			Ток, $I_{BX} \times 10^{-9}$ А/м ²			Постоянная времени релаксации τ , мин
		Натирающие поверхности (трикотаж)*)									
		х/б	синтетический	бамбуковый	х/б	синтетический	бамбуковый	х/б	синтетический	бамбуковый	
39	+	10,7	15,2	14,4	94,7	134,5	126,7	0,05	0,07	0,06	34
40	+	11,9	16,0	13,3	105,3	140,8	117,7	0,05	0,07	0,06	33
41	-	5,34	14,2	12,3	47,3	125,7	108,9	0,05	0,14	0,12	15
42	-	2,77	10,3	20,1	24,5	64,0	177,9	0,02	0,43	0,12	25
43	+	12,0	14,2	16,1	106,2	125,7	142,5	0,15	0,18	0,19	12
44	+	10,5	14,8	16,4	92,9	130,2	145,1	0,11	0,16	0,17	14
45	+	26,3	9,87	50,0	232,8	87,4	442,5	0,18	0,07	3,6	21
46	+	17,1	16,3	15,5	151,3	144,3	137,2	0,09	0,08	0,08	27

*) х/б трикотаж – состав: х/б 100%

синтетический трикотаж – состав: х/б – 80%, ПЭ – 15%, эластан – 5%

бамбуковый трикотаж – состав: бамбуковое волокно – 85%, ПА – 10%, лайкра – 5%

Приложение Г

**Результаты измерений напряженности ЭСП
в системе «обувь - человек - окружающая среда»**

Табл. Г1. Результаты измерений напряженности ЭСП в системе «обувь - человек - окружающая среда», 1-ой серии испытаний

t, с	Напряженность ЭСП, В/м								
	Модель № 1			Модель № 2			Модель № 3		
	№ опыта								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	-13020	-18964	-13468	-8663	-5454	-9370	-9146	-8148	-8361
1	-14804	-18631	-16723	-8871	-5907	-8928	-9516	-9349	-8314
2	-16005	-16816	-14710	-7722	-5298	-10743	-6515	-9188	-7852
3	-13977	-18262	-14544	-6936	-4950	-9583	-9464	-8231	-9120
4	-17191	-18371	-15865	-8663	-7373	-7701	-8897	-10784	-8502
5	-17206	-15938	-14679	-9339	-7784	-7176	-7072	-9744	-8299
6	-15220	-16005	-13135	-9854	-4170	-8127	-10966	-10410	-9308
7	-17518	-17825	-16062	-9391	-5792	-7358	-10166	-11003	-6869
8	-18470	-15392	-14440	-7997	-5179	-7976	-9084	-9204	-9245
9	-17612	-17357	-12890	-8512	-4680	-8190	-10930	-9776	-9464
10	-19021	-17643	-15412	-10348	-7280	-6557	-8845	-11902	-8096
11	-18933	-15688	-15314	-9380	-6364	-6494	-12027	-10093	-9328
12	-17773	-13592	-13743	-9864	-4726	-5938	-12298	-10961	-7285
13	-18049	-16510	-15579	-9178	-5725	-6422	-8075	-10264	-8829
14	-17321	-14809	-13941	-7841	-4721	-6068	-11481	-8106	-11091
15	-16161	-13852	-12396	-7628	-4903	-7254	-11034	-10509	-7368
16	-17945	-17347	-15792	-9178	-7540	-6801	-10556	-10301	-8429
17	-17414	-15371	-15823	-9032	-5548	-5834	-13681	-9068	-6884
18	-14196	-12235	-13208	-8242	-5428	-5605	-12012	-10774	-7950
19	-16078	-14736	-15116	-7680	-5662	-5990	-11206	-11029	-8673
20	-15142	-15267	-14050	-6884	-4357	-4898	-13379	-8632	-7311
21	-12604	-11762	-11960	-6266	-4404	-5371	-12282	-12755	-8600
22	-14523	-16374	-14965	-6541	-6801	-6572	-13754	-11798	-7035
23	-12979	-15782	-14258	-6234	-5512	-5631	-12989	-9594	-9817
24	-10852	-13265	-13072	-4862	-5241	-4295	-10764	-11658	-10015
25	-13015	-15860	-14424	-5600	-5657	-5059	-13421	-10675	-7040
26	-13436	-14222	-13748	-5106	-3993	-5813	-12968	-7285	-8039
27	-10847	-13426	-12178	-4555	-4232	-5964	-10826	-11476	-6359
28	-9510	-16302	-14596	-6094	-6515	-6900	-12937	-10020	-7139
29	-11830	-13993	-15152	-6032	-5148	-5262	-11627	-9958	-7852
30	-13197	-14258	-13062	-5174	-5090	-4430	-11148	-11538	-6484
31	-11273	-16286	-13748	-5974	-5142	-5720	-12459	-10249	-7758
32	-14242	-15163	-14055	-4872	-4238	-5574	-11148	-7602	-6780
33	-13228	-14513	-11523	-5007	-5236	-5933	-10873	-10634	-5803
34	-10202	-16634	-13863	-6910	-7347	-7633	-11398	-8262	-6838
35	-13915	-14918	-13650	-6562	-5038	-6416	-8559	-6453	-6292
36	-12027	-14352	-12537	-5850	-5990	-6084	-8138	-8273	-6744
37	-13613	-16952	-13707	-4934	-5683	-6812	-10082	-7202	-7274
38	-15714	-14586	-13743	-4160	-4700	-5720	-7056	-5709	-5616
39	-12922	-12438	-12604	-5278	-5756	-6557	-8502	-6978	-7982

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
40	-13520	-15516	-16307	-5948	-7930	-7264	-7706	-6000	-7446
41	-15995	-12994	-16785	-5798	-5200	-6011	-5714	-5543	-6853
42	-13150	-12558	-15137	-5730	-7586	-5766	-6728	-7181	-7857
43	-12116	-15943	-15802	-4721	-6146	-6250	-6328	-4976	-5356
44	-14528	-15048	-16801	-4326	-4638	-6260	-5985	-5616	-7670
45	-11668	-12651	-14112	-5231	-7004	-6484	-7316	-6375	-7826
46	-11107	-15912	-16468	-5293	-6879	-7134	-6151	-5122	-6801
47	-14513	-15828	-14352	-5387	-5241	-6011	-5324	-4352	-7831
48	-12615	-13561	-13447	-5252	-6994	-5267	-6884	-5990	-6385
49	-11767	-15990	-13629	-4238	-6250	-5137	-4992	-4056	-5896
50	-13702	-17830	-13478	-3624	-4721	-5928	-7264	-6500	-6942
51	-13556	-16031	-11616	-4555	-7248	-6130	-8179	-6500	-5392
52	-12552	-16224	-14367	-4669	-6827	-7040	-6146	-5106	-5834
53	-15178	-17851	-12563	-5179	-6406	-5642	-6890	-6162	-6151
54	-15865	-16411	-13046	-5319	-7207	-4815	-5772	-6156	-4347
55	-14560	-16390	-13650	-4888	-5408	-4737	-6827	-4570	-5782
56	-15080	-17903	-13436	-4986	-5262	-5402	-7685	-6900	-5803
57	-16645	-15750	-11741	-5948	-6791	-4664	-6468	-6058	-4430
58	-15293	-13972	-15282	-6089	-6250	-5272	-8034	-6198	-5179
59	-15038	-17414	-13676	-6874	-6910	-5829	-7207	-7092	-4732
60	-17804	-17295	-13218	-6188	-7545	-5876	-6453	-6240	-5132
61	-16343	-16562	-14804	-5465	-5855	-5200	-8148	-5652	-5850
62	-12708	-18465	-14736	-4976	-6593	-5761	-7025	-7332	-5324
63	-13842	-16936	-12771	-6853	-7779	-6000	-6125	-6650	-5730
64	-14263	-14674	-16307	-6396	-7170	-6037	-6271	-6396	-7347
65	-12922	-17903	-16062	-7191	-8018	-7410	-5527	-6479	-4888
66	-14456	-18844	-15048	-7155	-8611	-6692	-7425	-5751	-6354
67	-14908	-17607	-15953	-6375	-6999	-6869	-7051	-5501	-6650
68	-12433	-18413	-17066	-4222	-7820	-6713	-6058	-5564	-5850
69	-13587	-16983	-14778	-5912	-8387	-7259	-7217	-5657	-6983
70	-16343	-13171	-17310	-5402	-7072	-7508	-7560	-5688	-6739
71	-14357	-17056	-17466	-5954	-7217	-6250	-6635	-6177	-5995
72	-15906	-17440	-15194	-7165	-7467	-7144	-8096	-5345	-7415
73	-17045	-15350	-17284	-6411	-5548	-7222	-7820	-4721	-6364
74	-15069	-18470	-17768	-6255	-7742	-7118	-7519	-6526	-6676
75	-15756	-17794	-14752	-7519	-7503	-8970	-8803	-6432	-5725
76	-17877	-15563	-16801	-7581	-5761	-9479	-8112	-6375	-4227
77	-16447	-18200	-16780	-8512	-7363	-7862	-7846	-6962	-5127
78	-16369	-18085	-16182	-7789	-6780	-8668	-10472	-6520	-5314
79	-18434	-16858	-15979	-8829	-5428	-8002	-9224	-5865	-5907
80	-18226	-18132	-16520	-8476	-7451	-7113	-10155	-6728	-5896
81	-17659	-18657	-13598	-8491	-6016	-8642	-10680	-7098	-6260
82	-18974	-17030	-15293	-8730	-6515	-8158	-9053	-6895	-4492
83	-18824	-17758	-16541	-9068	-6728	-7389	-10680	-7623	-6786
84	-18428	-18938	-16343	-7602	-6406	-7898	-11668	-7519	-6874

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
85	-18636	-18319	-16265	-8242	-5428	-7888	-9744	-6598	-7066
86	-18179	-17815	-15657	-9755	-6422	-7191	-11845	-6968	-7498
87	-16312	-19167	-13000	-10093	-5439	-9001	-12615	-7659	-7207
88	-17087	-18345	-13941	-11133	-5808	-7711	-9661	-6869	-8096
89	-18626	-17711	-14528	-10977	-6879	-8314	-13228	-7108	-9469
90	-15314	-18881	-14097	-9516	-4981	-7498	-12532	-8902	-8164
91	-13977	-18444	-13759	-9079	-5668	-8294	-10212	-7009	-7982
92	-15646	-17269	-14497	-10384	-5662	-7160	-11809	-8158	-9230
93	-14092	-18444	-11372	-9942	-5090	-8049	-10665	-8595	-6531
94	-11674	-17664	-11694	-10712	-5439	-7560	-10634	-7118	-9583
95	-14092	-15256	-12942	-8564	-5647	-6931	-13722	-8018	-9152
96	-13967	-18397	-12641	-8299	-3816	-8361	-12225	-7748	-9048
97	-11450	-18090	-11923	-8299	-4638	-8039	-14112	-6011	-11190
98	-10249	-16182	-12896	-8814	-5158	-7441	-14575	-9484	-10056
99	-13608	-17789	-11611	-7332	-3853	-8751	-10602	-8533	-6832
100	-13504	-16603	-11143	-7862	-4966	-7914	-13348	-7732	-7950
101	-12084	-13088	-11954	-7144	-4492	-7430	-13249	-10498	-7316
102	-15069	-15844	-14248	-7051	-3234	-7555	-11502	-10566	-7898
103	-15007	-15100	-12438	-6427	-4451	-7555	-11856	-10259	-8871
104	-12235	-12308	-12105	-6858	-4139	-7103	-11705	-12984	-7436
105	-14773	-14201	-13083	-6708	-3593	-7524	-10150	-10878	-8143
106	-15423	-14300	-11216	-6110	-4461	-7690	-13629	-11133	-8101
107	-14950	-10660	-13577	-6042	-3660	-7056	-11986	-12724	-6073
108	-16811	-12911	-13691	-5824	-3005	-7202	-11668	-12168	-10727
109	-17123	-14903	-12469	-5865	-4383	-7373	-12807	-10010	-9599
110	-13228	-12885	-13837	-7087	-3962	-6827	-10639	-14185	-8392
111	-13410	-12620	-12755	-8101	-4180	-6489	-11081	-12516	-9900
112	-15995	-14513	-12927	-8023	-4316	-6021	-12797	-11975	-7935
113	-14305	-11138	-15709	-6853	-2849	-5834	-10795	-14211	-9557
114	-11653	-12485	-14632	-6089	-3619	-5595	-13015	-12298	-10067
115	-12578	-14518	-14632	-6864	-3593	-5382	-13598	-10280	-7971
116	-14487	-12038	-15594	-7784	-3468	-5288	-12173	-12797	-11206
117	-12074	-13098	-12854	-8164	-4170	-4628	-15002	-11185	-10228
118	-12885	-13894	-14092	-8621	-4139	-4830	-14170	-9250	-8398
119	-14705	-10530	-15693	-6286	-2350	-5038	-11424	-10051	-11081
120	-13629	-11684	-14762	-6276	-3421	-4258	-14809	-9136	-8507
121	-13676	-13520	-14461	-6962	-3837	-4581	-15454	-7571	-9838
122	-16608	-11299	-15163	-6656	-4316	-4648	-13374	-9292	-11528
123	-16338	-12516	-11975	-7748	-4144	-4201	-18028	-8746	-9214
124	-15553	-13530	-11757	-6786	-3702	-5850	-14799	-7534	-11710
125	-16671	-10415	-14872	-5860	-3671	-4981	-12287	-8522	-12376
126	-17118	-11575	-13769	-5512	-4804	-4700	-14814	-7779	-9412
127	-14476	-12844	-13176	-6203	-4732	-5101	-11856	-5865	-14554
128	-15917	-10639	-13722	-6260	-4674	-5064	-10670	-7826	-12906
129	-17326	-10972	-13514	-7347	-3988	-5574	-13088	-6973	-12443

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
130	-16047	-12121	-12069	-6047	-3884	-6162	-10483	-5018	-14773
131	-16998	-8871	-15568	-5943	-4165	-5558	-8845	-6390	-13707
132	-16738	-11252	-15184	-5605	-3842	-5262	-11866	-6000	-14170
133	-13322	-11632	-14081	-7087	-4654	-5600	-8949	-4841	-16681
134	-11008	-9620	-14825	-6988	-4898	-4815	-10722	-6619	-12376
135	-14554	-12604	-15308	-7716	-4321	-4253	-10920	-5413	-12126
136	-13057	-13956	-12864	-6858	-4544	-5070	-9120	-4898	-14019
137	-13020	-11679	-15849	-6947	-4810	-4997	-11128	-6354	-9828
138	-14627	-15111	-16244	-6484	-4908	-5590	-10940	-4607	-13400
139	-13301	-14846	-15366	-8065	-5704	-5246	-8855	-5283	-11585
140	-12012	-13499	-16047	-7820	-5824	-5148	-11512	-5907	-8600
141	-16276	-15444	-16749	-7675	-5855	-5059	-8767	-4617	-12329
142	-14549	-16510	-15490	-7311	-5111	-5808	-7623	-4934	-10337
143	-13556	-13535	-16676	-6838	-5480	-5522	-8221	-5480	-10358
144	-16738	-13754	-17742	-6136	-5132	-6505	-8356	-4591	-12121
145	-15678	-14638	-16260	-8247	-6318	-6635	-6505	-6765	-8522
146	-13915	-13000	-12776	-7566	-6609	-6359	-8210	-5896	-10946
147	-16380	-12480	-15184	-6494	-6318	-5943	-6905	-5127	-11637
148	-17290	-13317	-14461	-5844	-5241	-7160	-6604	-6240	-7857
149	-15766	-10431	-15735	-4570	-6952	-7092	-6838	-5605	-11018
150	-16790	-12381	-15672	-5662	-5850	-7306	-6583	-5730	-9906
151	-18579	-13301	-13837	-6489	-6219	-7150	-5460	-7035	-6635
152	-18418	-13759	-13202	-6104	-6401	-7082	-6973	-5917	-9854
153	-18413	-13525	-15444	-6416	-6203	-6110	-6437	-8668	-7586
154	-19448	-16255	-13291	-6364	-4711	-7389	-5356	-8117	-8075
155	-18730	-13244	-14804	-5709	-5522	-7378	-7118	-7831	-9406
156	-17534	-14003	-15750	-8101	-6021	-7077	-5631	-8819	-6047
157	-17908	-16525	-13826	-7321	-5288	-7498	-7129	-6994	-8216
158	-18231	-16052	-14138	-7337	-6437	-6411	-7727	-6058	-8023
1589	-16879	-14705	-15485	-6765	-4924	-4690	-6520	-7488	-5142
160	-16546	-16738	-10649	-6754	-5527	-5028	-7087	-6676	-7389
161	-16005	-15896	-13119	-6177	-5309	-5361	-6364	-6073	-6422
162	-12906	-15147	-14482	-7976	-5205	-5761	-6354	-7030	-5194
163	-12350	-17789	-14045	-8184	-5631	-6338	-8377	-5855	-6708
164	-14690	-17440	-13431	-7950	-6328	-6188	-6666	-5662	-5756
165	-12516	-14580	-15917	-7207	-4461	-6052	-8231	-7779	-4763
166	-11065	-12958	-15220	-6416	-6318	-6354	-8008	-6864	-6474
167	-13338	-14918	-12204	-6593	-6167	-6307	-6754	-6120	-4737
168	-11299	-13156	-14783	-8439	-6546	-6780	-8325	-7737	-5928
169	-10264	-12916	-16889	-8746	-6510	-7534	-8356	-6884	-6583
170	-10483	-13982	-14050	-7800	-6910	-7207	-6130	-6151	-4487
171	-13546	-12688	-14918	-7118	-5512	-7144	-7690	-8616	-3910
172	-12563	-13930	-16894	-7139	-6973	-7680	-7212	-9011	-5428
173	-10431	-15272	-15360	-6786	-6494	-7748	-5548	-6858	-3874
174	-12911	-12318	-13525	-9011	-6817	-7878	-7508	-7514	-5683

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
175	-12656	-14575	-16858	-8502	-6744	-7009	-6427	-9682	-5844
176	-11299	-15688	-17232	-8044	-7191	-6895	-6078	-8543	-4154
177	-14892	-14227	-16104	-7092	-5740	-7207	-7633	-11726	-4669
178	-13187	-14892	-18475	-6541	-6744	-7841	-6468	-10030	-5876
179	-12781	-16588	-18111	-6032	-6406	-8205	-5309	-7519	-3712
180	-15490	-13774	-16452	-7898	-6801	-8486	-8086	-8959	-5704
181	-13774	-15605	-18392	-7675	-6916	-8621	-6359	-9552	-5293
182	-13249	-16801	-18803	-6541	-6692	-8678	-7207	-7685	-2943
183	-15506	-15969	-17134	-6307	-6458	-9859	-8096	-10457	-4331
184	-14357	-15724	-17820	-6572	-6505	-9843	-6172	-9542	-4945
185	-11835	-18179	-18902	-7087	-5517	-9074	-6562	-9703	-3697
186	-13275	-16192	-18532	-7597	-6531	-8647	-10176	-12391	-5595
187	-13639	-17508	-18579	-7202	-7451	-8330	-8668	-11434	-3868
188	-11606	-18839	-19328	-6099	-7425	-7841	-10311	-11715	-2740
189	-12428	-18631	-18174	-5818	-7404	-7919	-10462	-12381	-3192
190	-13847	-18709	-18330	-5798	-7555	-7696	-8054	-11232	-3998
191	-12890	-19281	-19125	-5865	-7087	-7451	-11356	-10202	-4342
192	-12870	-18501	-18548	-6120	-7727	-6619	-11892	-12963	-2740
193	-15251	-17888	-16889	-5616	-7924	-6604	-9900	-10998	-2958
194	-12942	-19026	-17550	-4336	-6536	-6702	-11949	-11154	-3510
195	-13556	-18283	-16577	-4414	-7280	-6406	-11284	-13925	-2360
196	-16957	-17586	-15657	-3801	-6562	-5777	-10727	-12318	-4815
197	-15891	-18402	-18236	-4882	-6671	-5839	-13624	-12303	-4284
198	-13686	-17383	-16052	-5189	-6531	-6026	-11237	-14632	-2303
199	-14809	-15459	-14492	-4877	-7545	-5553	-11824	-11388	-2995
200	-15600	-17674	-16244	-3983	-5881	-5652	-12786	-12188	-3832
201	-14788	-16146	-13608	-3806	-6931	-5205	-12287	-14076	-2995
202	-17102	-15173	-12693	-3218	-6281	-4903	-13338	-10982	-4045
203	-16286	-16380	-16296	-4180	-6016	-5382	-12448	-12027	-2917
204	-12058	-15345	-15750	-5059	-6094	-5631	-9755	-12022	-1955
205	-10904	-13254	-13832	-3749	-6229	-5153	-12578	-10322	-3255
206	-12890	-14736	-14825	-4258	-4966	-5200	-11382	-10821	-2678
207	-12937	-14887	-14097	-3484	-5283	-3967	-10483	-10649	-2886
208	-13540	-14029	-12225	-3047	-4622	-4227	-11393	-9292	-3931
209	-16442	-12365	-15059	-3905	-4815	-4638	-9713	-8694	-2698
210	-14346	-15054	-14596	-4227	-4690	-4461	-8330	-8502	-1903
211	-14362	-13566	-12755	-4087	-4908	-4435	-10488	-6957	-3369
212	-16728	-13577	-12604	-3442	-4425	-4477	-8434	-7384	-2932
213	-14612	-15776	-14846	-3187	-4378	-4082	-7420	-7784	-3832
214	-15423	-14690	-13410	-3827	-4409	-4061	-9230	-6063	-4503
215	-17492	-12599	-11762	-4550	-4882	-4383	-8850	-6864	-2776
216	-16078	-14029	-14835	-3291	-4820	-4388	-8034	-7160	-2199
217	-15480	-12630	-12350	-3406	-4685	-4056	-9469	-6312	-3702
218	-17773	-12157	-10275	-3062	-3686	-3640	-9100	-7072	-2605
219	-17955	-14965	-12402	-3359	-4108	-3385	-8278	-7415	-3822

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
220	-17310	-14154	-11476	-4134	-4217	-3114	-7462	-5943	-4076
221	-19006	-11622	-9978	-4123	-3790	-3811	-4810	-5439	-3047
222	-18844	-12781	-14123	-2818	-4440	-3489	-1700	-6864	-2735
223	-18626	-12558	-12906	-2886	-3832	-3978	-1357	-5896	-4206
224	-18309	-10056	-9516	-2724	-3572	-3276	-1258	-7248	-2620
225	-18470	-12984	-10842	-3317	-3790	-3213	-1461	-6874	-3858
226	-16078	-12594	-11887	-4108	-4056	-3432	-1159	-6562	-2912
227	-14258	-10613	-9542	-3036	-4238	-3988	-889	-6422	-2106
228	-17139	-11611	-11351	-2568	-4045	-4238	-904	-2282	-4409
229	-15080	-11798	-12911	-2262	-3463	-4248	-686	-88	-3811
230	-13431	-10254	-9115	-2532	-3671	-4222	-764	-364	-2818
231	-15641	-12412	-8398	-3458	-4284	-3452	-842	-187	-3988
232	-13364	-12708	-10956	-3780	-4232	-124	-676	-400	-2854
233	-11960	-10020	-10602	-2480	-3707	20	-816	-182	-2350
234	-13702	-10779	-9817	-2776	-3978	36	-863	-270	-5356
235	-13748	-12313	-12927	-2714	-3286	-416	-660	-109	-4357
236	-11336	-9542	-10587	-3291	-3931	-681	-629	10	-3775
237	-11658	-12443	-8190	-3837	-4232	-603	-759	-265	-3728
238	-13473	-11273	-11096	-3926	-3988	140	-738	-135	-3863
239	-12038	-9786	-11497	-2652	-4232	-540	-556	254	-3837
240	-10202	-10748	-9406	-3010	-4004	-785	-369	499	-889
241	-12729	-11882	-11627	-2787	-2865	-702	-546	312	-78
242	-14487	-8543	-11278	-2667	-3598	-826	-738	483	-249
243	-13806	-11356	-7446	-3530	-3988	-821	-618	452	-390
244	-11648	-10717	-9344	-3796	-4893	-868	-431	598	-483
245	-8845	-9084	-9833	-3166	-4778	-728	-364	442	-603
246	-8294	-9500	-8798	-3182	-4856	-665	-462	306	-530
247	-9583	-11471	-11169	-3510	-5090	-660	-410	494	-5
248	-8564	-8611	-11814	-3629	-2111	-712	-78	473	-249
249	-7196	-10556	-8106	-1144	-1476	-967	-364	161	-530
250	-4747	-10275	-10202	-1544	-1440	-920	-608	104	-426
251	-3250	-9718	-10010	-1690	-1632	-842	-587	-10	-629
252	-2428	-9360	-8886	-1877	-1372	-696	-421	228	-514
253	-1638	-11788	-9297	-1632	-998	-665	-977	145	-72
254	-2272	-9521	-11757	-1632	-1040	-759	-1123	223	-213
255	-2407	-10171	-7883	-1674	-816	-743	-1326	249	-504
256	-2600	-11289	-9354	-1482	-655	-884	-904	416	-426
257	-2230	-10103	-9193	-1320	-894	-982	-1008	213	-192
258	-2225	-9037	-8325	-1310	-2064	-920	-982	254	67
259	-1908	-6635	-7581	-1315	-1976	-644	-1138	353	15
260	-1840	-6697	-11138	-1487	-1939	-655	-847	296	-353
261	-1752	-7748	-9484	-1216	-1695	-676	-1206	0	-421
262	-1684	-6614	-7597	-998	-1461	-920	-1289	-296	-197
263	-1762	-5350	-7332	-873	-1253	-899	-1310	-213	161
264	-1508	-3317	-8200	-920	-1190	-915	-1040	-338	-624

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
265	-1508	-2116	-10717	-1071	-1331	-629	-1050	-317	-1050
266	-1393	-1684	-11367	-1222	-1502	-561	-1237	-46	-847
267	-1492	-1679	-11070	-1128	-1430	-494	-1211	10	-566
268	-1404	-1627	-9240	-1008	-1284	-660	-748	-338	-260
269	-1112	-1872	-7233	-852	-1071	-748	-551	-405	-145
270	-988	-2121	-7992	-686	-1242	-759	-686	-410	-249
271	-1211	-2246	-7020	-774	-1216	-712	-925	-416	-166
272	-1346	-2381	-5704	-972	-1544	-629	-561	-535	-114
273	-1211	-2007	-4144	-920	-1242	-754	-561	-681	26
274	-1019	-2007	-2636	-639	-1071	-1310	-707	-639	109
275	-863	-1788	-1887	-546	-1138	-1352	-696	-478	-93
276	-1024	-1752	-1752	-592	-1294	-1305	-520	-535	-228
277	-1206	-1887	-1653	-868	-1227	-962	-286	-722	5
278	-1097	-1783	-1591	-722	-1336	-930	-608	-561	254
279	-728	-1596	-1612	-561	-1258	-696	-676	-618	171
280	-837	-1372	-1274	-124	-1008	-431	-551	-483	-46
281	-941	-1721	-1222	-109	-1170	-613	-343	-384	-218
282	-936	-1523	-1274	-197	-1190	-686	-364	-405	166
283	-899	-1430	-1248	-405	-1211	-592	-561	-202	228
284	-665	-1326	-1175	-369	-1055	-676	-395	-161	-57
285	-852	-1118	-1190	-197	-1180	-322	-104	-462	-109
286	-915	-1346	-1144	-145	-1066	-358	-202	-88	83
287	-910	-1378	-915	-452	-1034	-312	-348	-135	140
288	-738	-1107	-452	-509	-1107	-421	-296	-176	197
289	-592	-1034	-322	-572	-1086	-374	-135	-234	208
290	-587	-1138	-223	-483	-863	-634	-275	-156	223
291	-639	-910	-223	-270	-780	-488	-462	67	-5
292	-696	-1331	104	-468	-1045	-358	-223	-135	218
293	-634	-1118	10	-691	-1232	-67	-223	-332	410
294	-426	-998	-98	-540	-1107	-395	-130	-78	353
295	-592	-1118	83	-520	-1190	-525	-239	5	223
296	-634	-1133	124	-426	-790	-509	-348	-124	-46
297	-722	-1237	150	-670	-863	-239	-280	-254	130
298	-483	-1107	-10	-915	-1024	-504	-161	26	239
299	-296	-1050	218	-1092	-1144	-390	-327	176	301
300	-431	-1066	244	-795	-1081	-629	-291	36	208
301	-561	-1066	20	-863	-785	-717	-182	-119	83
302	-603	-1190	-15	-1008	-754	-603	-114	-10	57
303	-551	-1227	78	-863	-1019	-317	-218	-10	400
304	-473	-982	109	-982	-806	98	-306	-114	343
305	-509	-873	182	-743	-863	234	-208	-187	166
306	-592	-1050	5	-681	-696	239	-78	-31	145
307	-811	-1029	119	-806	-624	62	-15	130	41
308	-551	-967	98	-878	-598	52	-312	46	265
309	-442	-863	-20	-764	-738	114	-104	-145	358

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
310	-655	-863	-353	-696	-868	260	-15	-130	202
311	-769	-1149	-525	-613	-889	208	-57	254	109
312	-587	-936	-577	-707	-525	202	-338	-156	176
313	-462	-639	-67	-899	-530	20	-327	-228	312
314	-280	-452	-520	-873	-572	-93	-260	-145	400
315	-572	-494	-244	-738	-821	-41	-114	88	208
316	-733	-483	-228	-603	-785	-218	-332	-135	426
317	-603	-800	-150	-728	-764	67	-312	-156	332
318	-343	-702	-306	-821	-592	228	-109	-72	260
319	-348	-374	-161	-676	-681	-83	88	-72	374
320	-358	-343	-249	-811	-759	-254	-109	-72	410
321	-452	-468	-20	-582	-1019	-88	-46	-10	-41
322	-733	-535	-197	-780	-800	124	-83	-31	-15
323	-280	-426	-348	-655	-832	130	52	109	166
324	-301	-348	-67	-884	-717	124	-187	145	384
325	-364	-171	57	-535	-743	-130	-140	-135	140
326	-603	-327	-197	-608	-1045	-161	-130	0	114
327	-483	-598	-301	-670	-1164	20	104	161	-41
328	-348	-613	-140	-509	-1019	-124	-332	62	156
329	-369	-587	-156	-348	-728	62	-192	-213	343
330	-499	-197	-182	-364	-858	88	-218	78	239
331	-587	-166	-358	-322	-1159	67	62	104	234
332	-556	-442	-83	-603	-1206	-78	-88	-88	62
333	-176	36	-10	-665	-956	-202	-306	-36	265
334	-384	130	-5	-379	-748	-280	-343	15	317
335	-530	20	-244	-416	-795	218	-78	234	83
336	-509	-145	-46	-561	-712	109	-5	-15	98
337	-301	20	-41	-535	-972	-5	-239	-124	36
338	-187	114	-46	-499	-941	-202	-343	-31	234
339	-322	353	-192	-478	-738	-93	-176	124	286
340	-301	296	-124	-405	-733	-20	171	15	260
341	-306	182	41	-244	-795	-109	-187	-88	5
342	-124	36	20	-280	-816	-36	-228	119	104
343	-135	145	-176	-426	-769	-114	-20	114	-15
344	-254	301	-109	-514	-780	-26	62	26	291
345	-275	254	135	-312	-795	-187	-31	-187	395
346	-431	192	-41	-176	-832	-182	-197	78	208
347	-62	83	-254	-327	-878	-109	41	-26	57
348	-317	-119	20	-535	-889	-67	62	-806	140
349	-468	-187	-124	-514	-915	-130	-67	-317	176
350	-260	-483	-52	-218	-863	-332	-270	10	317
351	-83	-488	-10	-327	-655	-514	-72	135	135
352	-67	-530	-260	-322	-733	-265	192	-150	-26
353	-364	-442	0	-457	-806	-218	317	-187	296
354	-166	-260	88	-353	-956	0	78	-447	239

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
355	-213	-187	-5	-88	-530	-88	-93	-540	239
356	124	-260	-197	-41	-676	-296	228	-780	322
357	114	-322	0	-358	-696	-239	312	-603	171
358	-93	-176	-62	-348	-878	-249	161	-353	208
359	-223	-36	-114	-280	-832	-124	-93	-603	343
360	-88	-57	-62	-223	-941	46	208	-473	202
361	-36	-223	62	-52	-728	-31	202	-520	150
362	46	-301	192	-156	-660	-83	57	-447	-15
363	-67	-379	145	-322	-660	-379	-124	-416	-161
364	-145	-140	-130	-270	-894	-161	0	-525	-78
365	-41	-270	46	-249	-936	-130	265	-395	-52
366	36	-109	208	-135	-759	-26	26	-166	-192
367	-5	0	-150	-171	-566	-109	20	-176	-431
368	-124	10	-104	-286	-556	-291	46	-301	-150
369	-31	-15	20	-197	-785	-291	176	-202	26
370	208	-10	171	-156	-884	-296	57	-31	-88
371	119	-260	-109	-15	-842	-369	62	-416	-135
372	-140	-135	0	-98	-863	-15	-67	-421	-254
373	-213	-109	-150	-400	-738	-130	208	-395	-20
374	-83	88	275	-390	-686	-244	62	-192	83
375	306	161	109	-114	-722	-254	-52	-208	36
376	-41	-130	-72	-114	-858	-228	161	-291	-187
377	-20	-249	-161	-286	-925	-161	228	-561	-109
378	62	-171	197	-447	-572	-67	140	-78	-67
379	72	-83	197	-322	-608	-150	124	-135	104
380	166	104	-197	-41	-702	-499	-98	-208	-31
381	-36	41	-5	-239	-717	-395	228	-343	-286
382	-150	-156	31	-239	-743	-379	93	-176	-52
383	83	-150	244	-312	-686	-353	202	119	156
384	135	72	67	-57	-608	-161	62	-88	161
385	-67	104	-72	5	-447	171	52	-338	0
386	-150	15	62	-98	-644	83	166	-57	-275
387	-36	98	223	-208	-894	-72	197	78	46
388	83	-93	166	-249	-707	-254	72	-161	213
389	119	-171	78	-208	-598	-192	20	-343	26
390	-36	67	317	15	-561	-36	150	-114	-145
391	-114	-36	327	-114	-670	36	213	-192	-176
392	36	83	228	-270	-858	-208	36	-135	72
393	15	-176	-119	-317	-717	-270	-52	-286	228
394	104	-31	72	-171	-696	-197	98	-98	20
395	-83	-15	244	-72	-509	-322	88	114	114
396	78	124	-119	-150	-416	-20	72	-171	-114
397	10	192	-213	-332	-426	-208	-41	-306	15
398	-26	-41	-15	-234	-660	-15	-114	-31	114
399	114	-145	218	-145	-457	-301	312	88	31

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
400	46	26	192	0	-592	-348	88	-286	67
401	5	166	0	-187	-213	-405	-20	-161	98
402	119	-171	140	-384	-421	-114	-41	31	119
403	78	-171	301	-202	-582	-119	109	176	286
404	-15	-254	187	-57	-686	-176	20	52	114
405	-26	171	-26	31	-499	-187	-135	-197	-41
406	31	338	-36	-182	-400	-260	-104	-119	67
407	52	171	202	-306	-405	-145	31	140	390
408	124	41	171	-41	-462	-218	150	98	208
409	0	5	52	52	-468	-140	-93	-442	-20
410	20	109	-10	-223	-670	-78	-119	-686	130
411	41	249	223	-306	-499	-348	26	-748	405
412	130	124	161	-192	-327	-213	182	-1149	384
413	254	156	150	-114	-327	-140	36	-1159	265
414	78	67	78	-130	-426	-296	83	-1367	62
415	-31	10	265	-176	-717	-67	52	-707	182
416	57	270	306	-119	-592	-36	135	-504	182
417	228	317	286	-197	-540	10	5	-707	150
418	265	130	-52	-114	-280	-72	-36	-764	26
419	114	-31	244	57	-468	-202	223	-993	145
420	-187	-46	296	-166	-379	-26	171	-1092	478
421	135	254	301	-218	-577	36	124	-1424	249
422	280	244	46	-176	-504	286	124	-1242	-10
423	452	114	52	-176	-254	166	-5	-1071	72
424	228	-72	338	-83	-379	10	130	-655	239
425	41	-10	202	-78	-520	-41	208	-790	400
426	20	244	-20	-244	-431	-104	31	-826	140
427	317	291	244	-301	-551	234	-20	-421	15
428	249	114	332	-78	-405	182	114	-338	26
429	327	-104	280	15	-379	317	239	-426	218
430	275	119	145	-72	-156	88	98	-686	135
431	291	348	-5	-296	-364	31	-31	-556	202
432	374	374	192	-93	-535	140	171	-213	-88
433	405	275	478	-10	-561	286	192	-275	72
434	499	374	218	-98	-436	296	36	-374	202
435	202	280	36	-135	-275	374	-78	-67	218
436	46	249	150	-275	-291	171	36	20	78
437	249	390	462	-140	-426	-98	98	-156	244
438	306	166	223	88	-592	-41	-31	-234	358
439	280	306	-135	135	-525	166	-62	-140	400
440	145	296	114	41	-395	327	-67	-135	322
441	208	530	369	-296	-327	379	114	-150	150
442	166	483	202	-176	-322	202	41	-442	218
443	462	280	72	-46	-400	-41	31	-124	275
444	426	140	197	-83	-509	-46	93	-176	296

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
445	202	358	358	-10	-499	119	192	52	161
446	249	488	249	-239	-332	249	109	-348	0
447	265	702	26	-332	-145	156	-156	-254	254
448	452	353	135	-104	-348	182	-36	20	275
449	374	202	280	41	-442	36	10	41	78
450	296	405	275	-119	-494	-15	239	-312	176
451	156	587	124	-286	-395	98	-78	-98	-10
452	338	405	-83	-140	-88	182	-249	67	208
453	317	239	286	36	-228	364	124	93	150
454	317	161	442	93	-327	270	-171	-104	83
455	234	431	98	-72	-405	166	-223	-296	223
456	213	447	20	-150	-296	98	-119	-10	130
457	171	265	176	-208	-327	150	119	156	405
458	473	322	405	15	-223	187	41	41	109
459	442	166	156	72	-239	202	5	-145	104
460	369	395	-31	5	-322	208	-145	-244	197
461	161	421	171	-36	-551	52	145	-46	213
462	171	369	400	-171	-416	15	135	-62	156
463	556	379	182	52	-353	20	-10	-239	62
464	374	332	119	150	-171	150	-244	-176	88
465	280	447	36	-36	-208	416	57	-10	280
466	46	572	239	-244	-421	213	171	104	291
467	171	369	202	-135	-488	10	88	104	249
468	280	270	124	78	-374	-197	-140	-161	130
469	452	390	62	213	-301	202	41	161	353
470	317	436	332	-254	-301	254	88	228	546
471	5	483	338	-260	-348	223	62	171	62
472	249	338	135	-202	-317	124	-223	-140	26
473	395	322	41	-135	-514	78	-67	-140	239
474	348	436	249	83	-306	161	161	104	327
475	223	436	364	-213	-254	275	98	-119	197
476	223	525	208	0	-109	140	-161	-280	-20
477	161	317	-52	-275	-244	353	-93	0	93
478	249	364	104	-83	-436	260	150	-26	166
479	317	431	306	-15	-462	15	-57	10	270
480	140	499	249	-36	-364	-36	-150	-228	161
481	135	384	275	-119	-280	0	-67	-176	156
482	83	296	228	-197	-244	343	98	98	135
483	338	442	280	-130	-296	244	93	10	280
484	280	457	322	46	-384	228	-192	-270	109
485	280	504	36	-5	-452	-93	-187	-150	135
486	171	332	176	-187	-296	176	10	-119	88
487	182	390	332	-78	-197	197	-20	-20	270
488	353	317	260	93	-223	327	-98	-150	405
489	192	561	46	-26	-239	239	-140	-57	182

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
490	-20	509	20	135	-379	145	208	-31	384
491	20	265	312	-109	-364	93	-41	223	218
492	202	317	343	-161	-395	0	-109	52	208
493	374	436	78	-104	-244	291	-239	10	254
494	395	556	88	-10	-140	234	15	104	374
495	145	322	280	52	-161	286	145	234	114
496	10	239	197	-114	-332	166	-124	114	41
497	270	468	41	-140	-379	31	-234	46	280
498	291	499	20	-234	-301	88	26	-52	416
499	275	546	468	-26	-150	322	119	265	161
500	239	296	353	46	-88	509	57	130	176
501	31	301	20	41	5	176	-130	52	171
502	286	400	161	-46	-374	78	-36	-1388	301
503	312	608	348	-187	-400	98	171	-301	353
504	322	566	161	-67	-338	176	-46	-26	78
505	93	457	93	88	-286	260	-93	0	57
506	57	384	228	31	0	234	-93	-67	239
507	244	530	405	124	-202	244	182	31	374
508	353	374	223	-332	-468	213	-52	140	20
509	312	478	124	-98	-520	-72	-88	-109	150
510	161	358	249	15	-254	228	-57	-702	-36
511	93	488	369	135	-124	275	301	-884	494
512	166	332	234	46	-234	452	213	-462	431
513	275	577	171	-46	-327	275	36	10	234
514	104	686	-20	-130	-296	140	46	-322	150
515	62	223	104	-78	-265	20	171	-171	150
516	187	317	15	-20	-234	98	0	52	218
517	353	473	-343	-15	-280	317	-156	109	192
518	265	509	-109	15	-270	317	-171	36	119
519	223	431	93	-166	-197	270	166	-98	104
520	78	400	223	-187	-223	218	-26	0	384
521	208	416	-187	145	-301	-62	-93	260	384
522	426	572	171	26	-296	52	-88	166	104
523	187	369	20	36	-114	213	-46	-83	62
524	98	270	124	-41	-135	332	5	0	254
525	52	343	-88	-176	-239	364	-52	93	161
526	374	364	161	-10	-358	135	-31	140	-202
527	171	561	145	67	-306	83	20	-156	78
528	197	442	26	93	-260	171	145	-161	41
529	-98	286	-145	-124	-98	286	-83	301	327
530	135	514	197	-140	67	301	20	166	379
531	322	561	109	-46	-130	228	332	-78	228
532	343	551	145	-26	-353	208	228	-26	-20
533	265	384	-67	104	-374	5	-161	218	-98
534	213	275	-78	104	-88	119	10	239	-218

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
535	275	348	-390	-41	-5	358	317	176	-348
536	447	457	-348	-46	-150	410	187	31	-239
537	332	379	20	-104	-208	150	-20	140	-26
538	124	400	-156	202	-317	135	-36	187	213
539	-10	317	46	135	-228	-52	-135	234	244
540	234	187	-280	-104	-218	197	-62	26	208
541	296	395	145	-234	10	416	-249	62	67
542	369	452	130	-171	-88	405	-192	104	104
543	171	473	140	5	-192	249	-78	156	208
544	150	244	-98	78	-317	130	-78	26	384
545	156	332	119	-20	-291	124	-291	62	260
546	306	348	265	-10	-62	348	-213	36	-26
547	182	514	62	-161	-83	291	-192	265	135
548	41	499	-109	57	-46	161	-280	-98	280
549	327	338	202	46	-119	353	-213	119	390
550	322	270	286	-31	-270	109	-327	-20	52
551	208	483	15	-93	-353	135	26	312	-109
552	0	535	-31	-78	-332	197	-93	161	140
553	124	509	192	46	-104	488	-46	-15	421
554	202	332	265	-41	-104	291	10	135	452
555	338	197	-36	78	-244	270	57	166	182
556	239	379	31	10	-182	83	-161	41	109
557	109	494	213	-275	-280	130	-161	104	343
558	208	462	192	-338	-218	145	67	5	317
559	483	171	52	93	-114	488	124	104	135
560	312	291	41	156	-41	312	-10	15	228
561	57	473	176	41	0	270	-93	-540	270
562	260	624	197	-98	-197	228	15	-847	135
563	452	452	62	-156	-306	93	213	-1206	176
564	306	306	218	10	-208	67	-156	-1159	5
565	187	405	306	0	-46	317	-119	-847	-208
566	-15	384	41	57	-130	426	52	-624	10
567	176	509	31	-182	-135	119	202	-707	20
568	358	509	208	-218	-208	-10	-239	-530	-166
569	244	338	202	-114	-197	-36	-72	-608	-176
570	171	296	135	135	-88	270	119	-509	-280
571	104	353	83	-10	-98	301	31	-483	-436
572	301	556	213	-119	-145	197	-223	-234	-119
573	322	405	369	-327	-104	119	78	-150	-405
574	171	379	46	-265	-187	187	52	-130	-707
575	41	254	31	-114	-280	145	140	-161	-722
576	213	400	327	-88	-192	213	-301	-88	-551
577	457	561	166	-78	-15	254	-36	83	-603
578	187	421	5	-187	10	109	150	31	-301
579	83	395	244	-358	-46	119	234	62	-410

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
580	46	410	374	-327	-260	104	-176	-150	-208
581	322	436	36	-130	-218	62	-31	-20	-15
582	436	442	0	-41	10	327	104	161	104
583	145	436	197	-312	-52	234	31	-36	145
584	114	197	197	-400	-114	156	-57	-135	130
585	31	228	140	-473	-119	72	-72	-176	327
586	306	400	83	-109	-249	78	213	93	338
587	301	613	182	-41	-395	150	72	187	384
588	124	452	317	-135	-202	270	-239	-98	5
589	171	473	15	-379	52	254	-166	-130	72
590	244	312	-57	-208	15	124	98	-104	265
591	197	421	254	-10	-208	78	-26	322	343
592	202	520	234	114	-317	156	-202	-67	254
593	161	551	104	-41	-124	166	-62	-114	-57
594	176	322	15	-72	-83	301	109	-161	327
595	197	312	228	-145	-83	348	124	244	348
596	384	613	260	20	-119	-62	-124	223	426
597	109	504	-5	78	-67	31	-88	-156	296
598	119	509	119	31	-119	124	72	10	400
599	239	369	301	-36	-202	275	234	145	499
600	275	239	228	-405	-145	260	-26	244	566
601	436	384	78	-83	104	20	26	-5	301
602	202	572	239	98	-234	5	-36	-260	156
603	88	457	208	145	-374	156	41	52	234
604	286	291	218	-145	-312	234	-72	208	301
605	369	254	10	-145	-317	332	62	275	426
606	145	436	306	-78	-239	208	93	-187	244
607	119	410	202	-104	-67	46	36	-57	5
608	176	587	312	-72	-171	15	-26	228	400
609	265	301	104	-83	-239	52	83	72	317
610	275	322	104	15	-369	306	187	83	390
611	93	390	223	-213	-36	332	36	-57	124
612	83	483	156	-213	26	395	-176	296	249
613	270	494	156	10	-202	10	36	208	312
614	457	270	280	20	-332	93	78	31	483
615	291	473	187	-182	-280	67	-104	-145	369
616	98	296	176	-275	-348	400	-5	109	291
617	83	572	98	-83	-468	327	88	182	140
618	374	447	265	31	-114	192	93	145	410
619	197	416	119	72	-213	140	31	0	504
620	228	187	-93	-20	-520	202	-93	119	348
621	26	301	218	-114	-348	442	176	197	135
622	275	410	260	-254	-312	176	239	192	291
623	327	676	114	-62	-306	312	-78	88	442
624	249	462	124	150	-109	166	109	104	566

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
625	-5	322	447	-119	-124	218	213	57	327
626	156	286	358	-36	-546	72	192	150	296
627	317	509	67	-286	-296	208	36	-26	384
628	395	592	135	62	-260	280	-41	36	624
629	182	93	384	-26	-192	364	83	104	353
630	228	280	223	-15	-104	124	52	156	-10
631	109	462	135	-72	31	-46	-78	119	260
632	462	587	98	-145	-114	124	145	52	535
633	270	504	275	-26	-234	317	124	140	535
634	275	244	343	197	-130	296	88	78	348
635	270	280	104	41	-26	67	-135	286	410
636	306	364	52	-322	10	26	-5	156	275
637	416	447	312	-254	15	202	119	-57	572
638	124	416	286	-62	-239	265	218	83	473
639	208	431	5	88	-249	322	-104	280	535
640	202	364	20	-36	-130	265	-57	-5	296
641	317	312	395	-218	41	156	83	-135	535
642	473	572	124	-182	-26	130	150	-10	379
643	234	494	104	-244	-62	228	-114	280	587
644	109	442	239	52	-202	208	93	52	343
645	306	244	260	-46	-208	499	202	-52	260
646	348	379	41	-145	-208	369	270	41	504
647	369	535	182	-358	-150	104	67	176	540
648	41	483	301	15	-78	124	67	358	494
649	187	338	192	72	-98	135	135	41	317
650	343	197	78	-67	-353	332	187	-109	426
651	431	369	192	-57	-280	249	-140	83	473
652	280	592	254	-239	-88	98	244	312	442
653	78	426	223	-93	-41	176	213	202	249
654	270	265	119	57	-46	228	-57	156	275
655	405	348	150	36	-208	332	-93	124	332
656	509	358	306	-52	-322	296	187	379	546
657	78	457	249	-218	-93	327	26	317	369
658	202	405	88	0	-67	98	109	130	400
659	234	338	156	-10	-67	114	140	130	234
660	291	369	202	109	-114	379	114	67	561
661	130	301	213	-93	-338	343	36	343	681
662	-15	530	-124	-234	-384	78	-52	140	494
663	265	452	234	-156	-234	213	140	41	416
664	416	192	306	88	-93	20	57	52	561
665	286	400	176	10	-187	176	161	78	447
666	114	442	0	-104	-130	286	-67	280	431
667	109	556	384	57	-192	270	156	36	405
668	332	327	296	223	-187	218	130	-83	488
669	509	384	-93	234	-130	-10	-5	166	499

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
670	291	327	150	390	-98	176	-15	374	618
671	52	483	343	410	-41	416	36	202	509
672	124	301	296	332	-109	301	244	124	410
673	348	509	67	202	-332	83	-67	109	343
674	358	286	291	275	-447	31	-15	291	613
675	140	223	301	405	-296	218	176	400	639
676	83	416	161	416	-41	124	145	-26	280
677	327	530	202	83	-15	343	0	145	374
678	447	239	223	83	-182	244	5	306	561
679	213	270	322	135	-410	187	286	296	556
680	62	312	156	447	-364	145	26	145	473
681	208	483	135	135	-239	-57	-145	-15	332
682	384	431	260	161	-10	197	-15	254	520
683	234	379	322	-36	-52	280	202	301	650
684	114	364	135	114	-213	156	114	213	728
685	145	286	104	514	-202	135	-15	31	379
686	338	608	332	239	-223	0	52	20	488
687	379	603	280	93	-62	145	244	197	603
688	124	327	36	-67	104	254	213	98	452
689	176	322	244	98	-150	390	-109	0	462
690	234	280	379	192	-62	130	36	-20	249
691	421	644	249	166	-249	72	332	306	317
692	452	395	78	-15	-296	114	67	218	364
693	270	421	270	-26	0	400	-52	187	332
694	286	291	322	-83	15	327	88	140	140
695	540	390	124	-10	-31	291	306	26	254
696	462	447	202	114	-72	104	57	176	312
697	488	416	312	-67	-260	-67	-130	182	546
698	109	390	327	-10	-150	10	5	109	244
699	265	202	104	-36	-78	343	234	36	192
700	338	379	197	52	150	462	57	244	338
701	650	639	338	192	-124	41	-98	244	338
702	161	457	332	93	-218	223	-20	67	176
703	135	343	109	-156	-280	-31	260	88	135
704	286	322	192	-15	-332	275	83	192	161
705	587	431	176	130	-161	192	-98	223	338
706	395	457	379	306	-98	239	-62	10	213
707	358	291	20	171	-239	72	275	-187	130
708	161	244	161	-41	-348	88	78	275	67
709	416	280	395	-57	-416	119	-57	46	114
710	447	535	369	223	-442	202	244	213	348
711	343	566	109	239	-119	260	182	-46	280
712	145	322	187	260	-26	280	57	218	213
713	317	166	410	130	-124	140	10	270	135
714	468	364	234	26	-395	78	88	202	249

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
715	494	546	192	213	-369	-46	104	46	348
716	369	530	114	312	-249	353	20	46	124
717	249	280	379	187	-280	395	67	228	140
718	447	197	135	52	-130	332	260	234	41
719	540	244	88	-130	-93	-26	31	202	223
720	192	644	239	62	-416	171	-5	10	353
721	171	540	410	202	-270	379	98	156	36
722	296	312	135	395	-369	275	114	270	197
723	504	395	161	192	-52	265	135	218	161
724	291	332	161	270	-98	-5	124	78	343
725	130	504	384	-98	-192	119	93	161	322
726	213	561	249	187	-270	218	332	223	260
727	546	421	83	317	-317	254	239	202	104
728	369	265	192	-57	-223	202	-31	36	369
729	332	254	421	-130	-15	171	140	26	348
730	83	452	239	72	-15	83	187	-46	213
731	436	514	72	218	-124	197	57	249	166
732	390	525	296	244	-124	395	15	171	218
733	353	223	400	20	-218	301	280	93	436
734	20	442	338	176	-78	327	166	5	301
735	260	431	202	88	-15	62	15	192	213
736	379	499	369	306	46	88	67	135	161
737	421	343	280	234	-161	31	104	10	384
738	187	291	31	15	-405	234	228	-114	327
739	202	228	57	52	-291	197	62	197	364
740	286	639	322	88	-192	270	-104	353	140
741	457	390	400	57	-31	88	176	20	187
742	312	317	223	275	-46	36	395	-57	322
743	223	353	109	291	-182	46	41	260	260
744	228	447	228	161	-275	296	-46	447	322
745	348	447	187	93	-317	197	213	187	202
746	332	546	312	62	-150	202	46	-93	374
747	223	416	171	156	-67	130	88	-10	343
748	312	239	161	265	41	-62	-41	109	176
749	218	327	384	26	-36	93	109	254	208
750	421	514	114	78	-254	296	410	135	275
751	218	374	109	171	-343	431	15	0	353
752	338	270	254	301	-135	260	67	234	473
753	182	338	426	249	98	-104	218	218	317
754	400	192	249	88	-88	10	182	218	145
755	218	478	218	15	-234	213	202	-145	296
756	135	431	254	130	-202	218	46	135	551
757	119	223	265	468	-213	275	-36	83	286
758	468	145	410	374	-67	78	327	223	228
759	228	343	218	140	-114	-10	135	78	119

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
760	187	436	140	332	-31	-67	10	-78	291
761	88	457	322	114	36	249	-15	-98	338
762	395	270	130	291	-254	338	405	343	280
763	473	270	192	447	-291	166	208	130	182
764	291	280	213	260	-244	228	-15	-57	52
765	296	525	249	57	-46	41	-72	41	421
766	270	514	379	208	-5	52	343	104	400
767	462	343	83	239	-20	353	171	239	187
768	286	270	265	286	-223	239	166	-57	109
769	286	478	301	384	-379	254	72	5	275
770	67	462	384	140	-109	140	332	166	488
771	270	540	140	161	-171	254	234	296	275
772	447	166	156	348	-5	-15	52	239	244
773	213	104	296	426	-36	410	-31	135	140
774	78	488	218	140	-57	260	358	244	410
775	312	696	223	135	-213	176	301	514	317
776	312	551	140	46	-67	171	-67	390	228
777	488	322	161	239	-67	15	5	156	166
778	234	421	332	431	-104	150	78	15	244
779	171	494	228	374	-31	410	286	338	468
780	150	494	0	223	-5	187	114	400	270
781	473	405	202	260	-187	275	10	301	124
782	379	410	208	322	-166	98	46	-62	187
783	275	218	301	540	-83	-26	275	-171	436
784	52	260	166	286	-286	416	36	-197	395
785	478	488	57	145	31	150	41	-67	197
786	369	629	327	228	62	156	72	-114	72
787	332	296	223	265	-182	114	327	-145	254
788	280	348	197	249	-286	52	83	275	530
789	249	254	166	390	-384	249	-5	140	202
790	436	462	327	182	-182	260	0	-20	187
791	338	426	364	114	83	296	338	-166	306
792	239	192	244	145	-72	187	187	140	416
793	234	197	150	431	26	-10	93	36	416
794	384	239	239	384	-145	104	10	78	431
795	535	546	509	317	-57	67	317	-57	286
796	213	603	176	52	-166	312	260	-5	348
797	166	228	150	67	-57	338	-10	270	332
798	410	223	83	265	150	124	-72	244	410
799	379	374	317	369	31	-36	322	83	426
800	447	587	260	145	-114	15	301	26	119
801	286	473	135	41	-405	421	57	135	291
802	228	338	291	213	-249	140	20	109	244
803	416	390	416	291	31	119	208	171	405
804	353	348	265	358	41	140	436	26	343

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
805	332	535	104	286	130	104	317	-78	176
806	254	556	208	187	-197	187	62	260	410
807	182	270	301	46	-228	322	57	223	270
808	384	327	192	197	-462	312	213	-270	379
809	379	509	145	431	-15	249	301	-130	187
810	353	421	150	223	15	52	176	41	395
811	135	462	520	-72	-36	-15	-130	145	478
812	348	223	114	-15	-145	166	192	31	364
813	452	202	83	-10	-265	369	150	-88	353
814	410	374	249	327	-182	260	36	-5	286
815	202	358	192	327	-114	140	46	145	442
816	239	468	161	31	0	15	145	124	494
817	442	135	98	36	140	109	187	-5	416
818	442	228	166	270	78	270	26	52	280
819	312	405	343	364	-88	348	-161	270	161
820	218	556	348	270	-182	260	119	182	275
821	327	452	197	72	-36	228	223	130	395
822	442	218	254	46	5	104	208	-244	306
823	317	296	296	244	213	20	-67	67	228
824	312	504	374	187	88	223	57	218	296
825	104	530	202	291	0	426	62	20	535
826	390	124	166	109	-301	234	327	-26	442
827	343	150	197	218	-223	182	-109	-88	208
828	358	364	488	332	10	104	104	156	223
829	218	608	140	280	150	114	124	-10	416
830	182	566	98	83	72	426	312	-36	572
831	452	296	249	36	145	275	98	-67	322
832	431	239	343	5	-104	-36	41	83	161
833	265	312	192	202	-135	145	140	187	312
834	197	566	114	150	-88	192	145	98	473
835	405	332	296	109	-26	208	124	-145	390
836	338	275	369	-46	291	244	15	57	244
837	291	374	275	130	166	280	192	161	265
838	83	525	234	228	-67	223	254	145	395
839	208	608	317	296	-98	15	93	20	499
840	473	338	374	72	-218	208	-130	140	291
841	348	260	109	114	26	234	202	218	218
842	98	254	202	223	26	338	275	353	161
843	208	379	234	171	114	124	150	5	312
844	332	416	416	218	-52	156	93	31	384
845	280	410	260	36	36	-31	119	218	286
846	275	327	20	-72	-166	286	88	234	280
847	135	192	213	202	-88	265	332	20	254
848	213	301	462	280	182	275	52	88	421
849	421	400	208	192	161	-15	57	140	353

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
850	358	213	140	-98	46	72	213	322	187
851	135	358	150	57	-109	98	213	109	343
852	197	296	431	270	-358	270	20	31	306
853	322	431	312	353	-52	296	10	-150	431
854	395	442	140	150	46	140	156	208	384
855	332	208	114	-36	135	197	348	72	145
856	119	286	421	166	67	176	150	-78	265
857	223	452	286	208	130	192	41	-52	499
858	369	546	150	353	-171	327	109	197	410
859	218	468	140	72	-223	291	301	286	343
860	254	202	197	52	10	57	150	0	265
861	265	254	358	52	104	150	-15	-93	332
862	364	514	119	358	124	265	130	104	504
863	405	395	124	395	31	416	176	291	395
864	223	234	358	208	-119	109	88	-36	192
865	249	218	275	109	-20	124	-5	-41	343
866	332	509	57	109	-124	20	119	36	525
867	322	530	187	156	10	62	208	166	457
868	202	483	322	322	36	228	104	150	130
869	140	322	410	10	135	197	62	10	249
870	156	275	140	-26	36	234	-41	-10	327
871	338	306	145	213	-223	187	67	410	452
872	286	514	426	192	-67	31	140	369	218
873	182	421	374	223	208	78	46	20	208
874	145	332	130	104	72	332	-150	-124	286
875	291	187	62	-10	182	291	244	140	572
876	317	494	364	114	98	280	369	322	473
877	260	556	405	338	-124	26	31	98	15
878	124	322	234	197	-109	265	26	0	270
879	286	213	145	150	-15	280	234	161	457
880	208	124	275	0	156	416	208	306	421
881	244	566	374	171	135	343	88	171	182
882	176	561	166	457	98	26	-140	-119	109
883	182	218	36	98	-88	124	109	104	421
884	239	239	187	-31	-41	124	72	239	301
885	249	421	322	15	15	546	202	-5	322
886	332	447	369	150	270	265	10	10	176
887	130	395	57	275	156	-41	135	62	395
888	286	358	213	176	-36	-10	156	296	379
889	348	239	457	57	-78	239	104	119	540
890	343	338	488	166	-150	421	5	-78	119
891	234	410	176	228	-72	213	26	62	312
892	208	488	239	182	166	228	286	322	317
893	249	218	410	-20	93	140	244	36	572
894	322	275	322	218	135	234	-72	67	218

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
895	166	400	62	114	-78	322	-46	114	260
896	171	530	192	239	-114	312	114	353	390
897	322	561	265	202	-78	124	182	67	530
898	483	166	390	213	52	192	-41	52	400
899	41	416	98	0	176	20	-10	26	156
900	265	410	150	145	31	187	166	176	239
901	338	504	468	244	-130	249	208	322	405
902	431	145	306	234	-239	296	15	-36	379
903	208	296	182	145	-88	62	88	-140	239
904	83	442	109	124	41	135	239	98	218
905	353	468	296	166	171	275	187	379	249
906	353	369	265	374	5	338	41	280	-5
907	192	145	234	249	-15	374	93	26	72
908	161	306	88	-67	-156	114	223	265	166
909	98	384	254	67	-31	57	114	234	213
910	379	436	410	343	0	130	78	171	291
911	369	317	171	260	62	197	-20	-161	213
912	31	218	166	31	208	265	213	197	254
913	234	213	239	88	-62	135	306	254	72
914	317	504	306	260	-31	114	-57	249	1289
915	358	499	364	452	-114	67	-20	-20	1534
916	317	317	114	57	78	322	130	10	1435
917	5	395	171	-67	0	244	156	254	1398
918	301	57	332	-67	109	452	78	78	1435
919	286	405	260	317	10	36	62	46	1341
920	369	447	57	156	-78	5	234	78	1279
921	244	306	296	88	-31	83	182	254	1258
922	244	249	348	41	-10	452	-52	296	1144
923	265	364	499	72	83	530	26	83	1294
924	275	410	135	78	93	109	270	145	1378
925	296	665	124	192	-145	41	197	338	1346
926	104	270	275	26	46	145	-15	234	1154
927	312	83	421	202	-208	182	-93	20	1300
928	431	338	57	171	98	197	197	130	1404
929	161	644	176	260	83	161	98	197	1326
930	156	592	301	135	109	187	62	244	1227
931	364	260	327	15	-15	-36	114	98	1190
932	291	140	156	-10	-26	286	135	83	1456
933	182	436	104	322	-140	317	265	213	1289
934	36	556	265	46	20	291	-5	364	1123
935	405	416	374	114	57	114	88	-41	1040
936	400	244	171	119	192	-62	114	36	1232
937	234	140	135	156	-36	20	265	145	1388
938	98	384	78	358	-5	192	-26	104	1258
939	301	457	431	192	-145	213	72	72	1274

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
940	275	530	291	145	-197	104	161	41	1237
941	249	234	109	150	171	-57	72	280	1346
942	10	306	109	301	176	78	46	197	1014
943	291	332	348	234	130	260	78	109	754
944	369	457	364	260	-46	176	-5	98	754
945	332	421	223	0	156	176	156	291	956
946	166	312	156	72	46	114	98	223	972
947	228	270	234	156	104	-15	208	72	972
948	254	234	301	166	52	114	130	119	904
949	280	322	145	72	93	140	26	197	967
950	176	436	234	41	-67	202	187	426	1331
951	192	223	494	166	-98	-72	72	-41	1133
952	317	405	410	260	218	-140	145	67	1003
953	306	249	161	197	228	36	-78	192	1253
954	150	499	208	62	176	218	46	171	1201
955	249	343	410	52	83	156	171	98	1154
956	161	442	416	369	-10	-93	197	78	1175
957	296	244	239	197	-31	-93	31	254	889
958	306	353	265	57	-52	-187	52	156	1040
959	-15	478	301	-5	197	166	218	72	1315
960	182	494	369	52	166	249	176	156	1144
961	473	192	239	410	93	62	-124	327	826
962	317	156	166	166	-124	-176	223	275	1149
963	317	374	260	31	67	-145	72	-36	1222
964	249	405	358	31	109	291	197	150	1133
965	327	410	228	192	41	213	-213	192	941
966	416	358	41	384	291	114	218	260	1045
967	150	286	218	-26	36	-124	442	93	1185
968	104	332	405	83	-78	-156	104	239	1185
969	400	364	312	254	-62	36	-62	254	998
970	405	317	150	374	254	400	119	104	774
971	244	109	171	83	208	176	223	-15	1258
972	228	317	462	-15	161	98	150	57	1206
973	135	338	171	36	-36	31	-119	166	899
974	504	520	161	410	-124	52	130	187	1003
975	135	535	104	187	119	265	182	-202	1118
976	171	306	499	72	176	286	161	135	1014
977	322	338	348	124	78	270	41	57	1237
978	379	296	150	213	171	-72	202	332	946
979	104	426	197	296	26	0	213	41	1201
980	119	530	447	145	-98	213	-88	-20	1164
981	291	104	317	36	114	239	88	161	1112
982	561	145	239	83	317	208	239	161	878
983	265	176	228	187	254	-57	291	93	1024
984	78	364	343	208	109	83	150	26	1128

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
985	197	431	483	26	-171	114	-31	244	1222
986	338	296	130	83	-124	312	301	228	899
987	260	62	140	88	98	182	244	166	1019
988	197	244	436	244	26	-213	135	98	1081
989	166	364	499	135	182	57	119	306	1133
990	374	462	239	41	-130	98	260	462	1190
991	353	338	369	78	109	228	156	301	920
992	244	187	384	353	-20	130	176	192	1190
993	234	135	452	364	62	156	-62	270	1102
994	332	348	410	156	114	-31	166	275	1055
995	338	473	156	114	130	-150	109	124	1045
996	192	343	343	218	-31	15	-124	10	982
997	145	260	520	20	-182	130	-41	395	1081
998	208	364	234	145	-41	400	260	462	1196
999	504	327	26	166	197	187	57	249	1024
1000	218	327	171	-20	275	67	67	161	1014
1001	83	197	540	192	10	202	166	254	1024
1002	182	166	488	161	-161	338	286	457	1066
1003	462	140	114	150	62	234	10	213	946
1004	192	254	114	-20	306	36	52	88	858
1005	317	364	322	187	145	156	213	374	1107
1006	26	421	338	254	57	202	379	421	1154
1007	353	119	260	239	104	332	15	130	1190
1008	343	249	161	78	-93	327	72	124	780
1009	145	468	431	93	78	213	145	218	910
1010	135	431	410	275	124	327	228	509	1128
1011	197	145	260	291	171	312	26	57	1019
1012	260	171	72	197	5	483	5	208	1045
1013	176	374	239	119	83	551	166	379	946
1014	62	390	301	239	-10	374	83	390	1055
1015	119	494	384	254	161	171	0	104	1248
1016	384	218	114	88	208	176	-62	119	1040
1017	176	228	78	20	119	265	98	265	873
1018	-88	192	468	156	5	332	67	270	1019
1019	187	338	296	202	-98	416	-46	260	1196
1020	405	546	98	322	98	239	-36	88	785
1021	208	426	182	72	223	78	275	364	930
1022	62	260	374	-10	202	306	46	369	816
1023	83	270	369	182	130	338	36	322	967
1024	379	332	234	270	-52	62	88	130	873
1025	265	468	145	317	78	15	306	166	655
1026	109	379	405	93	62	150	-72	338	707
1027	176	88	457	119	192	358	0	306	884
1028	462	-15	98	400	239	348	62	104	899
1029	509	551	135	286	223	270	156	234	702

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1030	62	384	161	202	-15	104	72	306	754
1031	244	239	416	72	-15	-5	-57	182	780
1032	104	114	280	187	78	93	197	140	780
1033	509	369	306	364	208	145	124	150	535
1034	234	322	213	182	223	171	-10	598	598
1035	119	400	421	-72	-135	88	-26	358	624
1036	176	312	338	88	41	-78	98	223	800
1037	312	301	140	228	10	-72	135	104	644
1038	280	265	176	239	114	286	-78	218	488
1039	119	431	379	83	140	218	-15	301	618
1040	254	275	312	20	-15	223	150	46	686
1041	280	353	104	187	26	-41	93	213	592
1042	364	182	156	317	-78	109	52	353	452
1043	98	270	156	223	-20	202	-57	384	488
1044	10	499	327	57	-15	280	244	78	520
1045	442	395	280	192	88	296	-5	145	603
1046	457	379	78	343	156	78	5	374	504
1047	67	239	239	327	-15	-156	145	379	530
1048	166	218	431	72	20	15	72	135	717
1049	280	488	109	156	-31	192	114	197	587
1050	410	379	52	156	88	239	135	442	468
1051	145	410	213	322	161	-57	135	234	374
1052	202	208	379	275	26	5	135	130	592

Приложение Д

**Графическое отображение экспериментальных и модельных результатов
измерения напряженности ЭСП
в системе «обувь - человек - окружающая среда»**

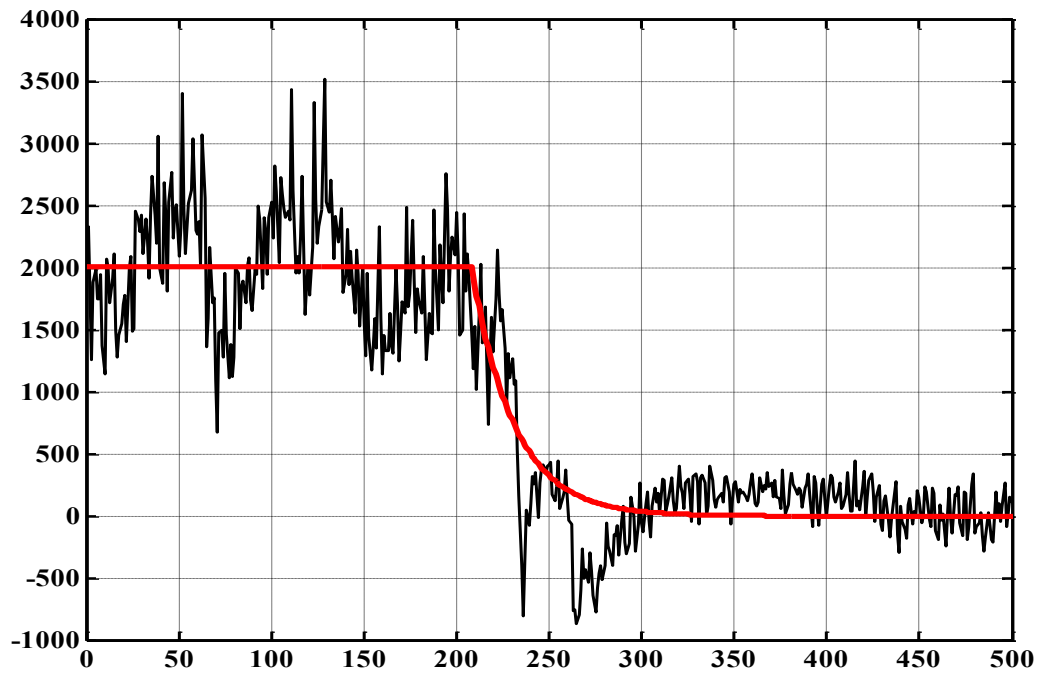


Рис. Д1 Экспериментальные и модельные результаты напряженности ЭСП, серия 1, опыт 2, модель № 1

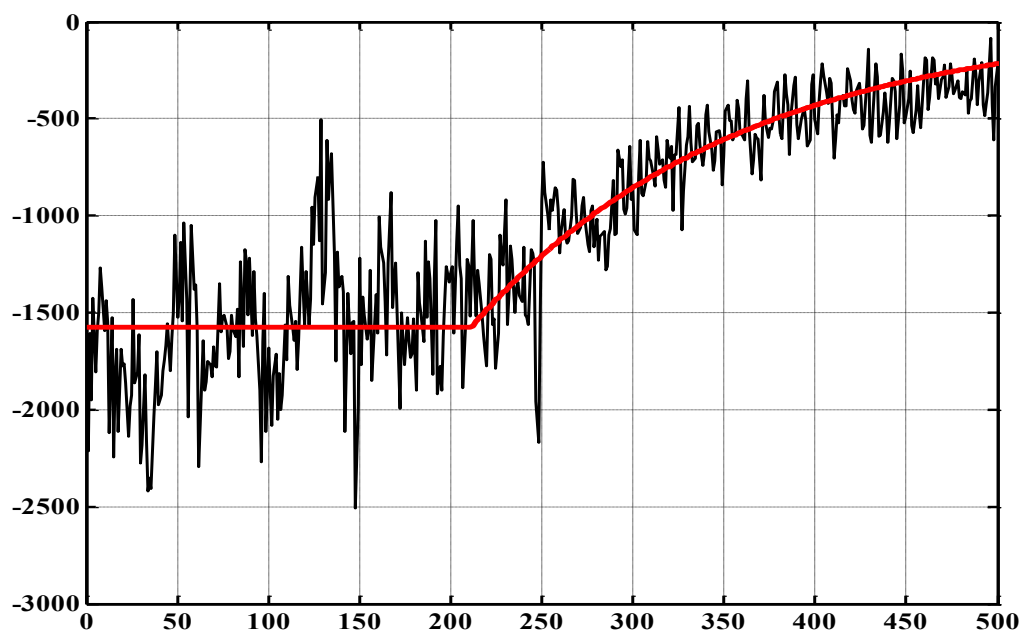


Рис. Д2 Экспериментальные и модельные результаты напряженности ЭСП, серия 1, опыт 3, модель № 1

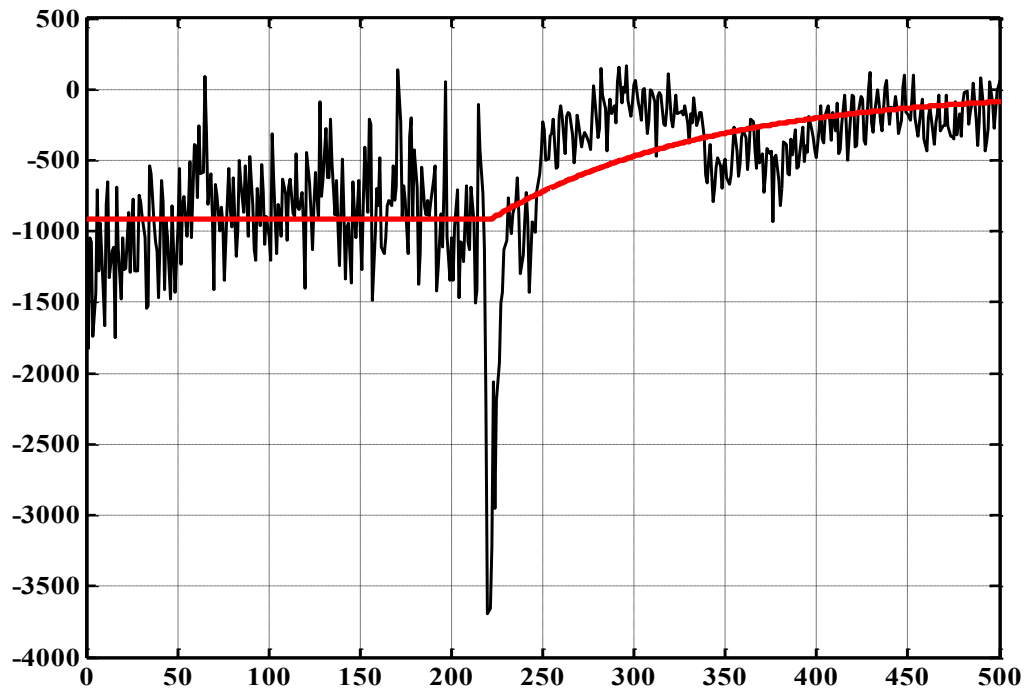


Рис. Д3 Экспериментальные и модельные результаты напряженности ЭСП, серия 1, опыт 3, модель № 2

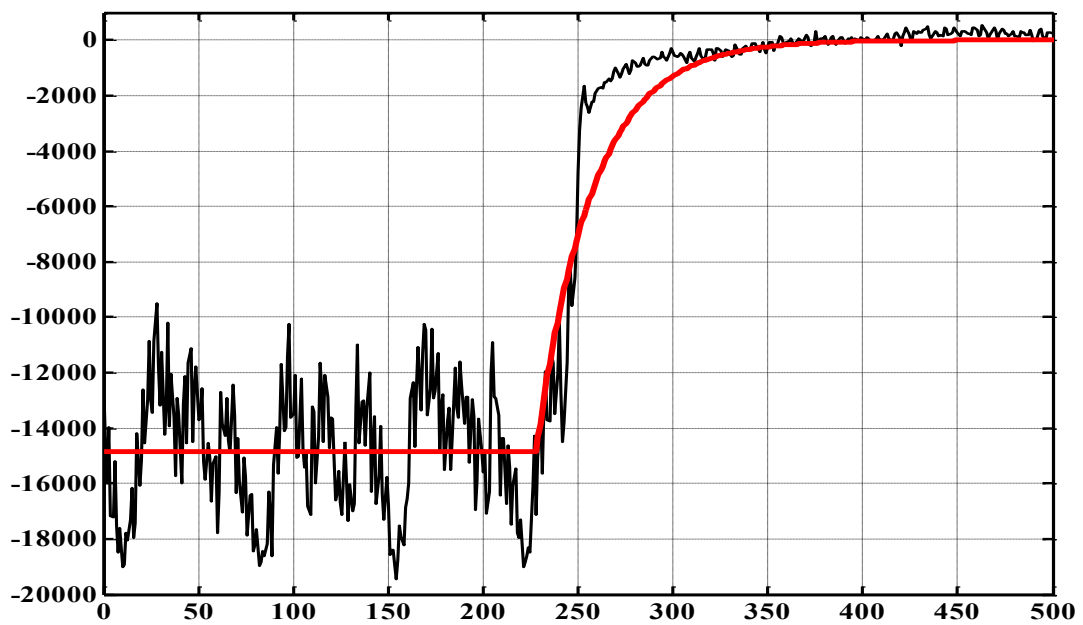


Рис. Д4 Экспериментальные и модельные результаты напряженности ЭСП, серия 2, опыт 1, модель № 1

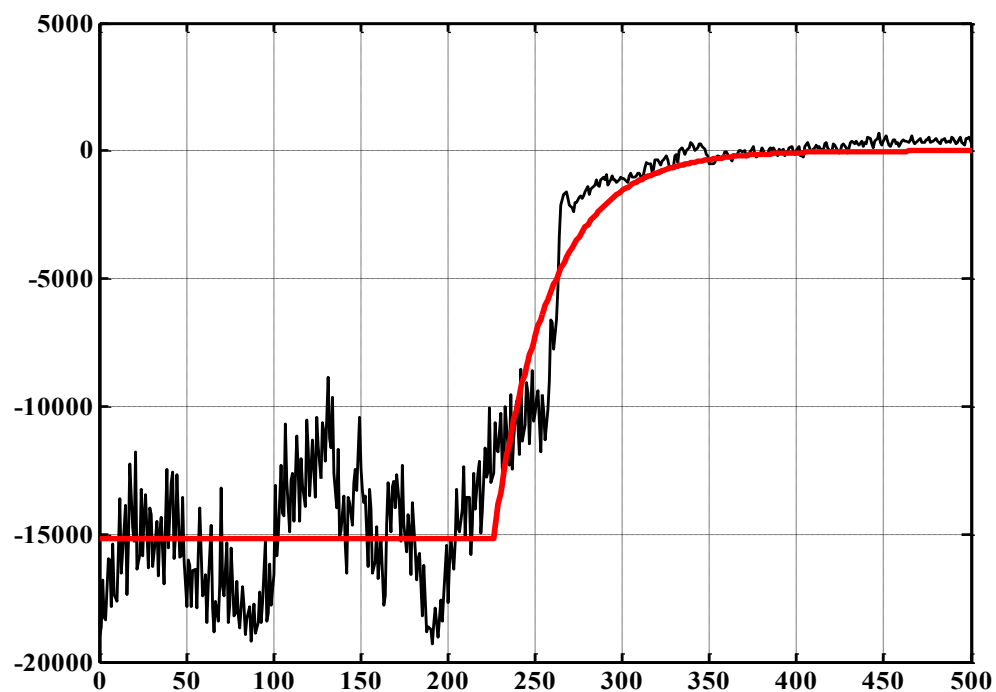


Рис. Д5 Экспериментальные и модельные результаты напряженности ЭСП, серия 2, опыт 1, модель № 2

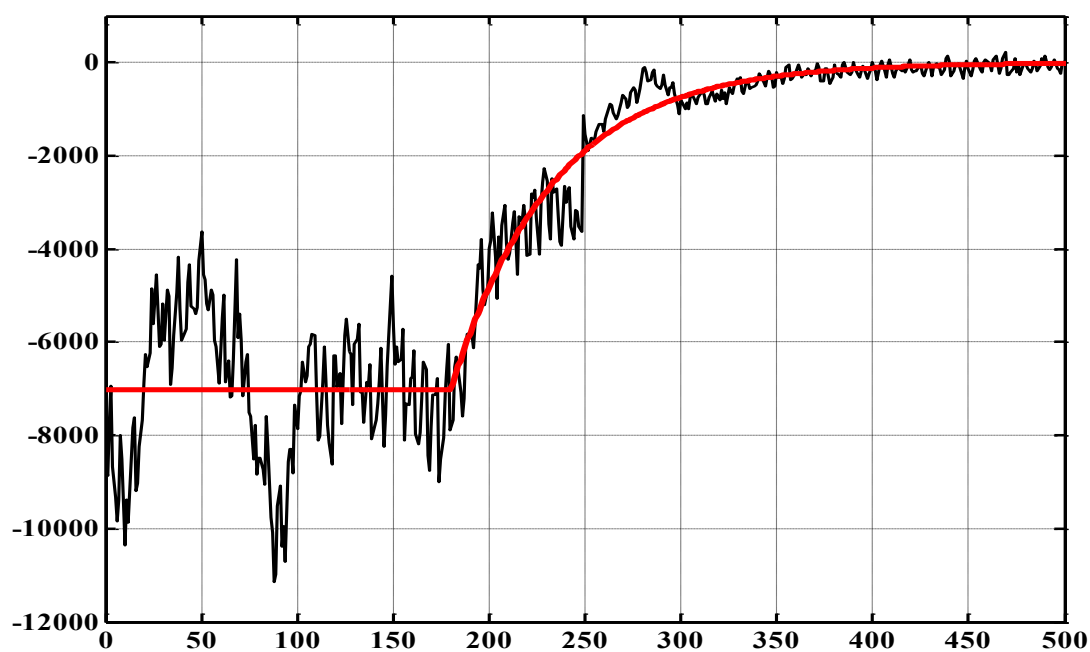


Рис. Д6 Экспериментальные и модельные результаты напряженности ЭСП, серия 2, опыт 2, модель № 1

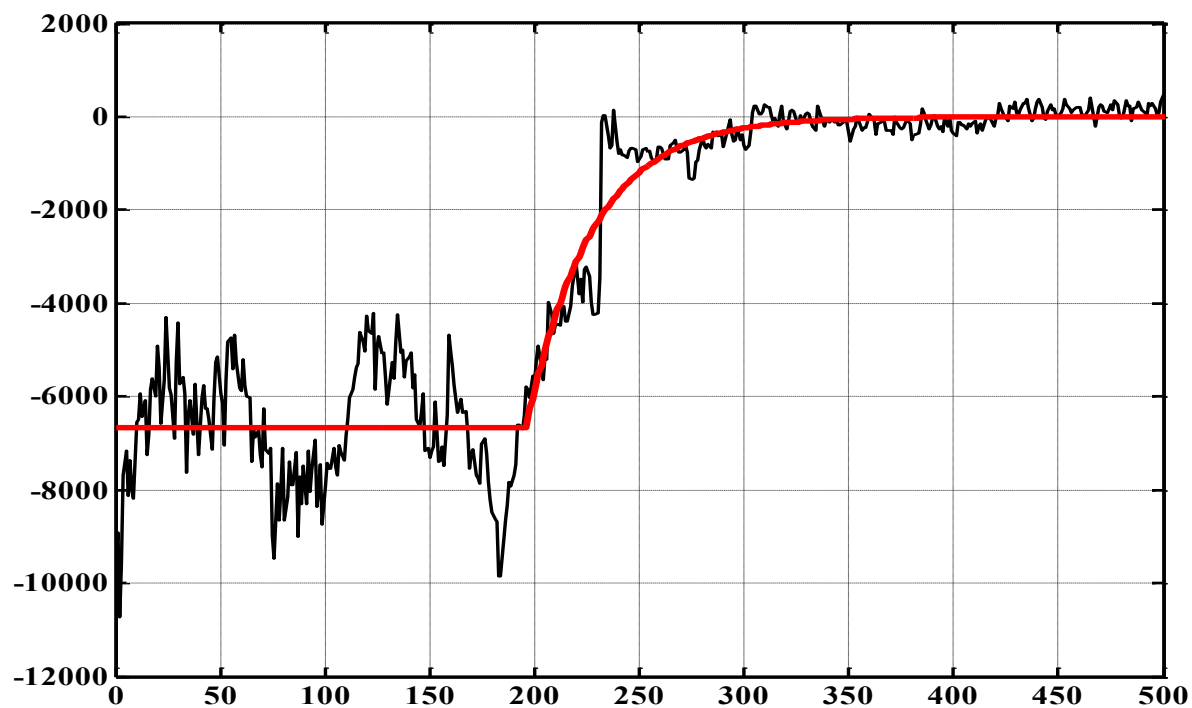


Рис. Д7 Экспериментальные и модельные результаты напряженности ЭСП, серия 2, опыт 2,
модель № 2

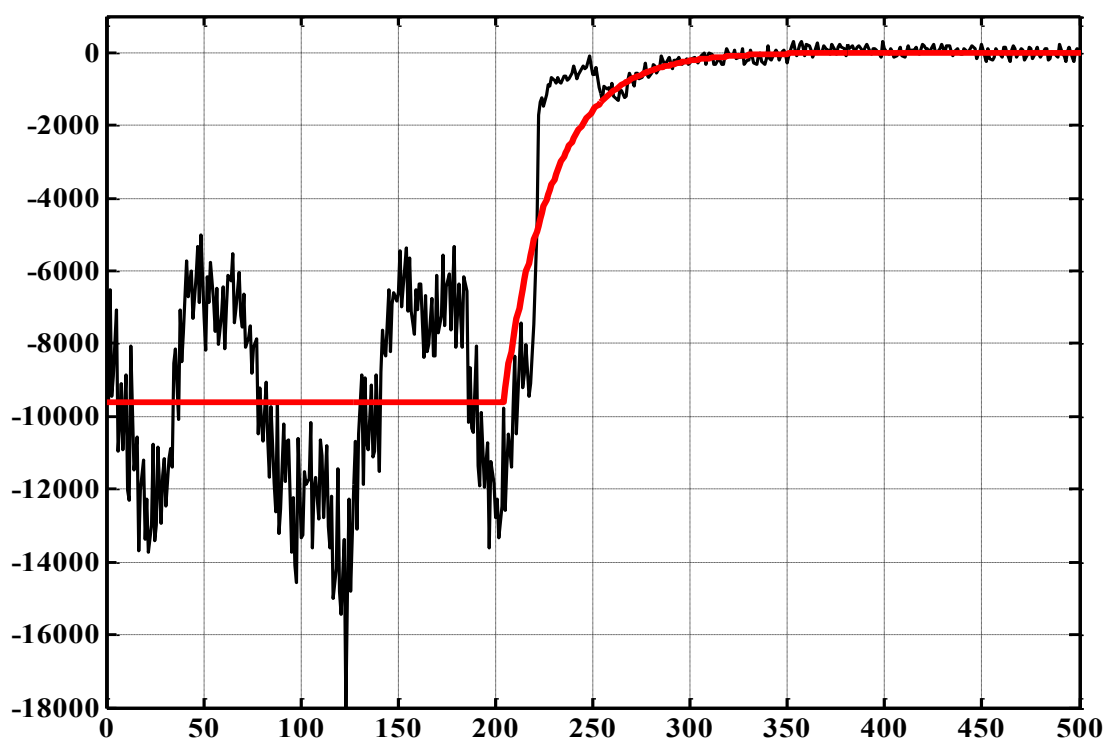


Рис. Д8 Экспериментальные и модельные результаты напряженности ЭСП, серия 2, опыт 3,
модель № 1

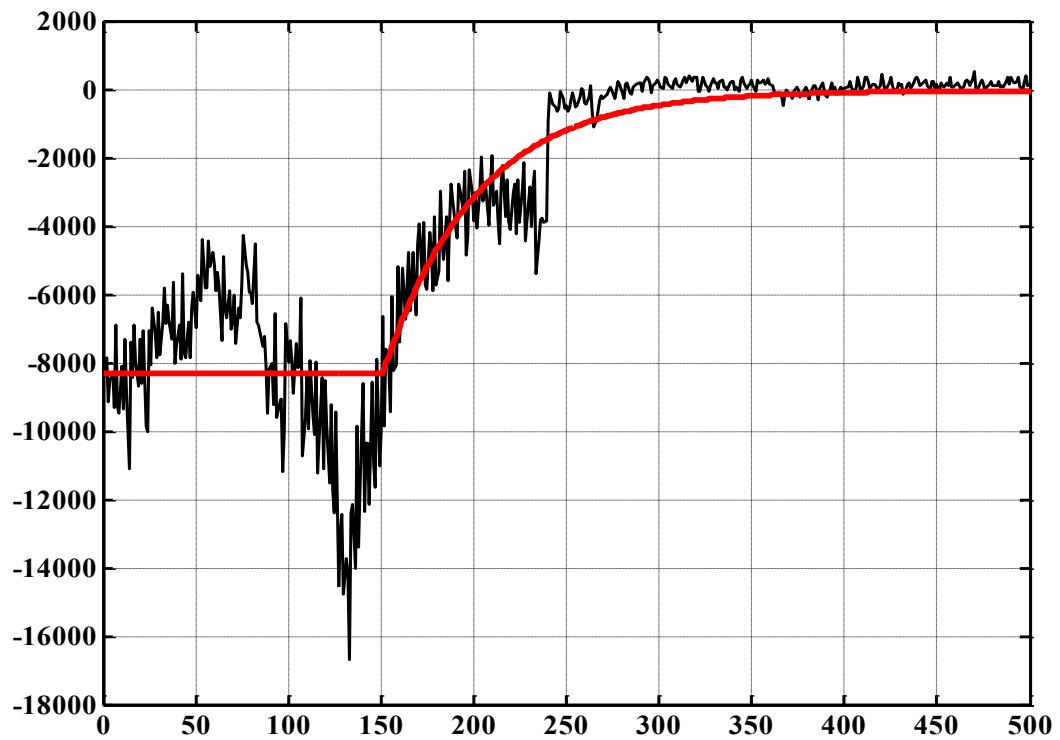


Рис. Д9 Экспериментальные и модельные результаты напряженности ЭСП, серия 2, опыт 3,
модель № 3

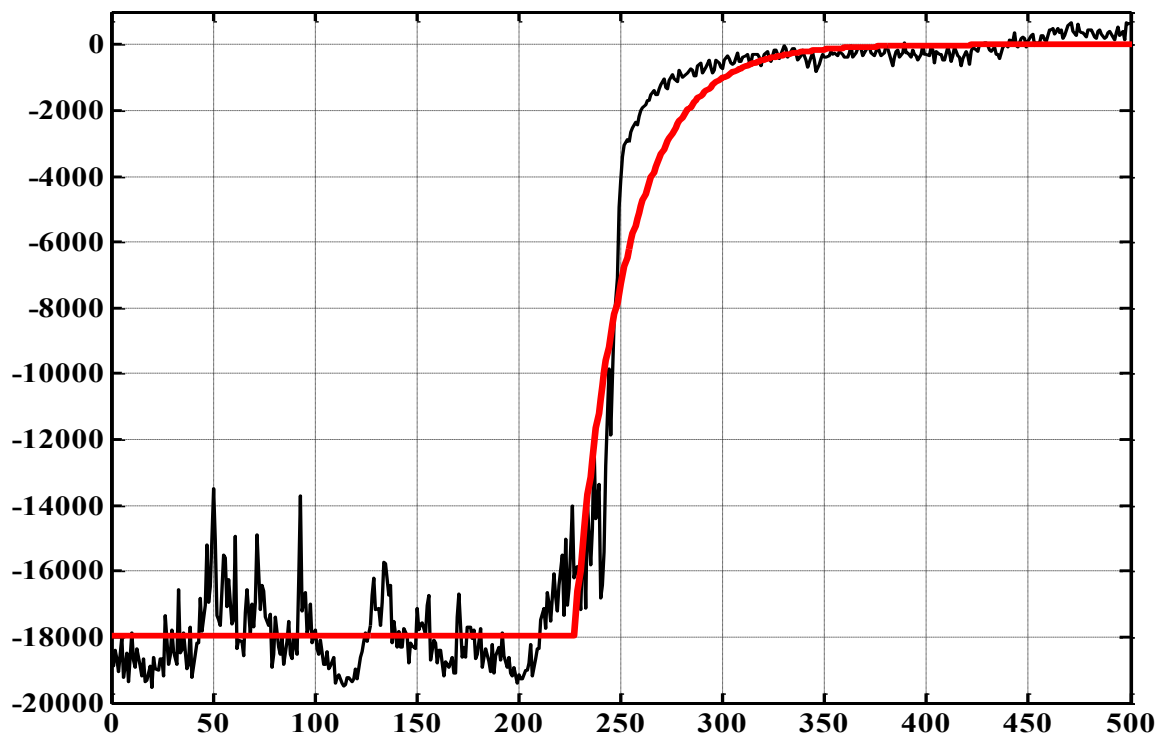


Рис. Д10 Экспериментальные и модельные результаты напряженности ЭСП, серия 3, опыт 1,
модель № 1

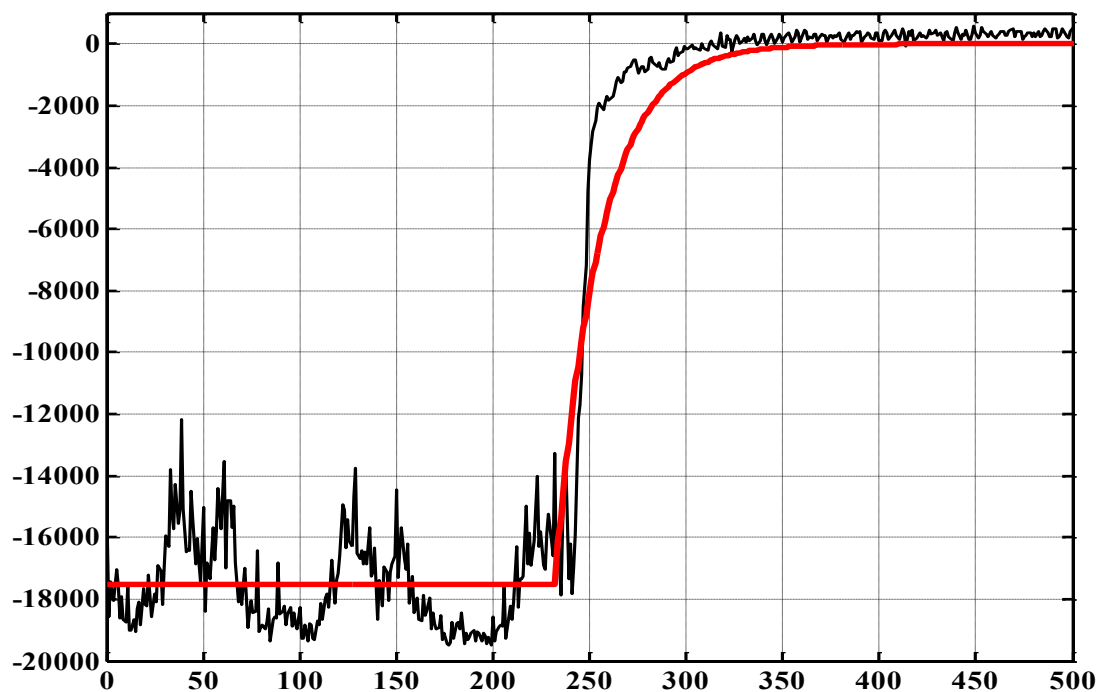


Рис. Д11 Экспериментальные и модельные результаты напряженности ЭСП, серия 3, опыт 1,
модель № 2

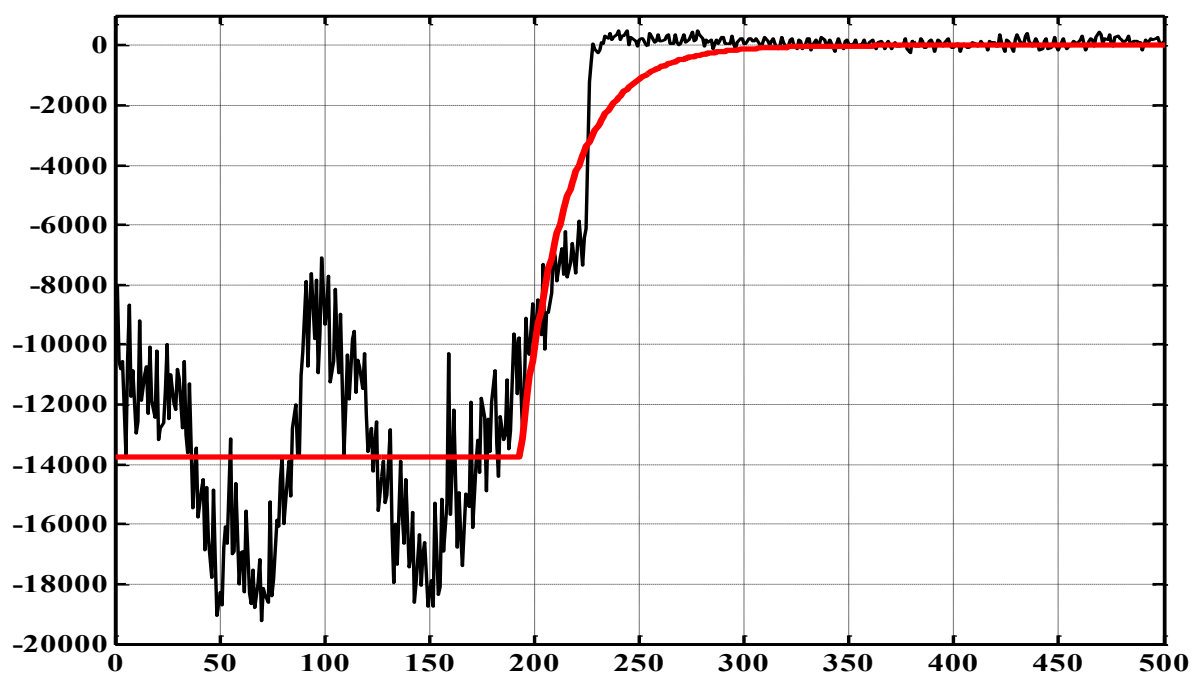


Рис. Д12 Экспериментальные и модельные результаты напряженности ЭСП, серия 2, опыт 2,
модель № 1

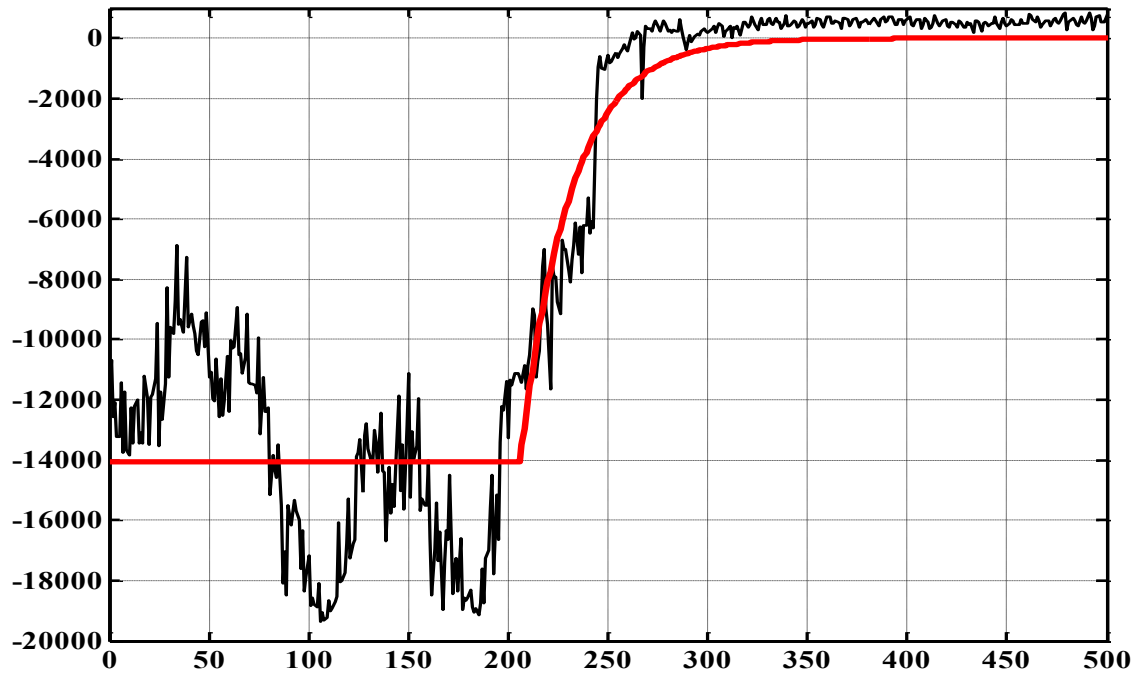


Рис. Д13 Экспериментальные и модельные результаты напряженности ЭСП, серия 3, опыт 2,
модель № 2

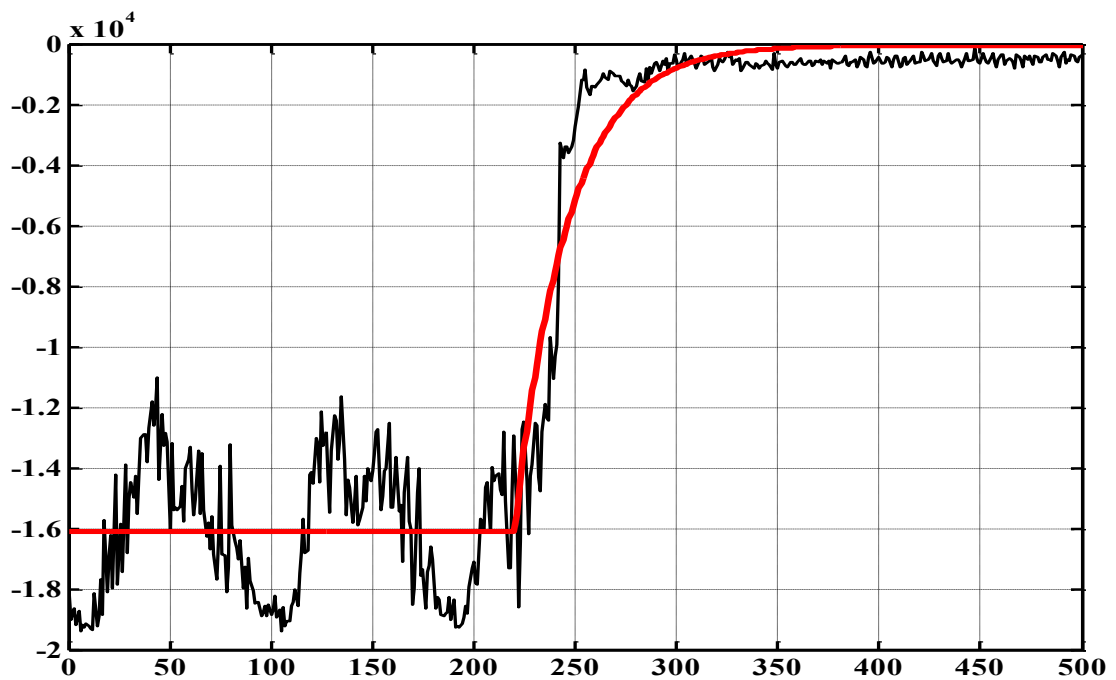


Рис. Д14 Экспериментальные и модельные результаты напряженности ЭСП, серия 3, опыт 2,
модель № 3

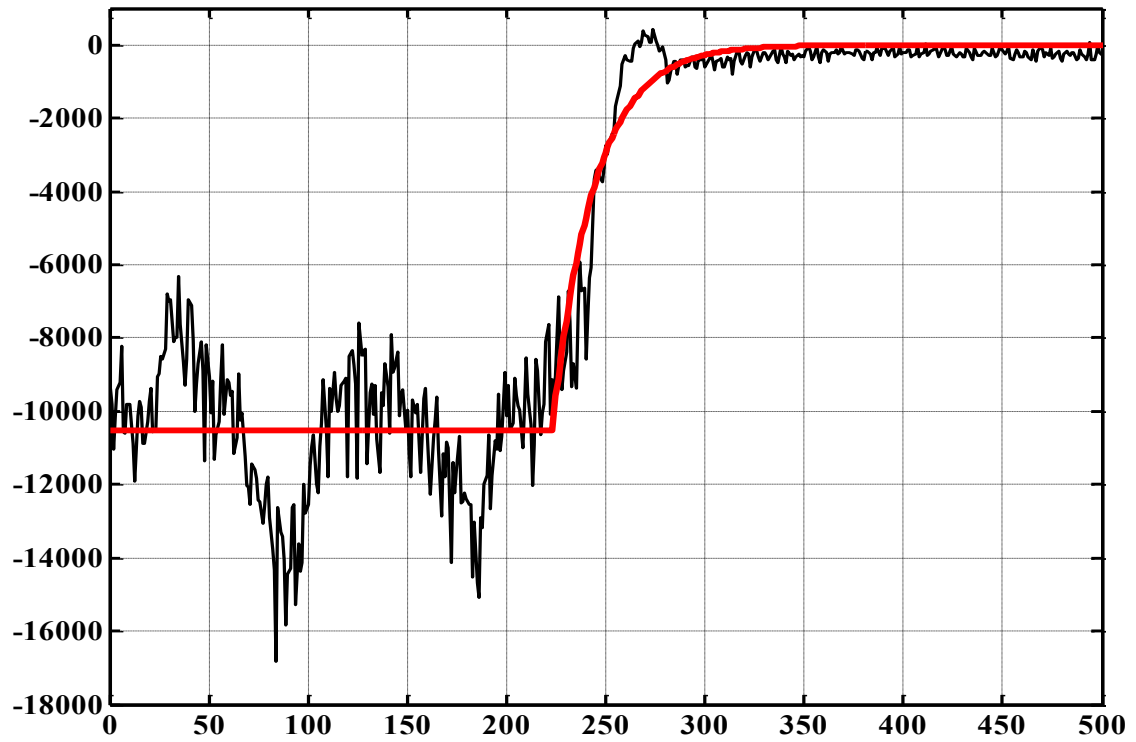


Рис. Д15 Экспериментальные и модельные результаты напряженности ЭСП, серия 3, опыт 3,
модель № 1

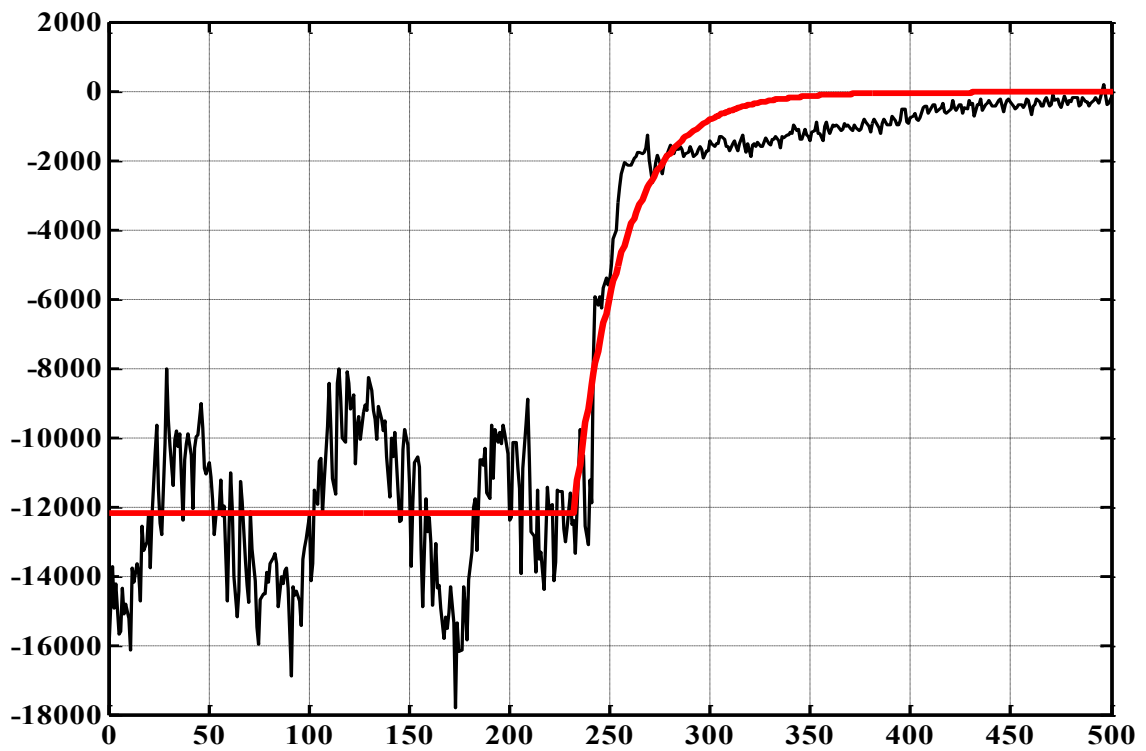


Рис. Д16 Экспериментальные и модельные результаты напряженности ЭСП, серия 3, опыт 3,
модель № 2

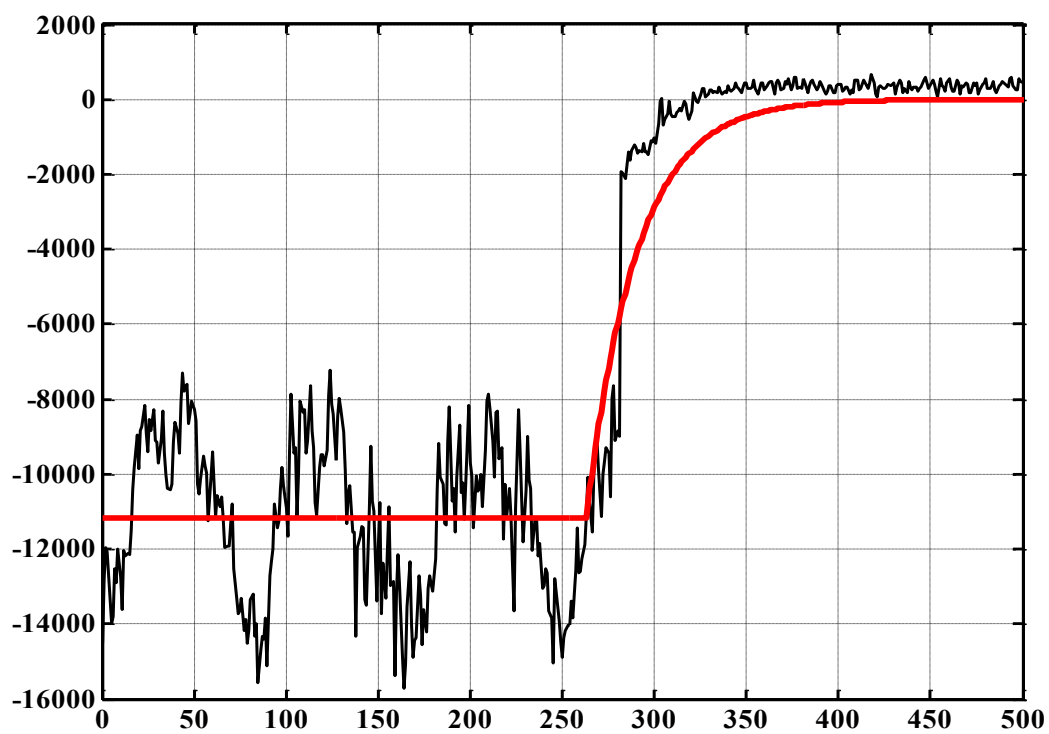


Рис. Д17 Экспериментальные и модельные результаты напряженности ЭСП, серия 3, опыт 3,
модель № 3

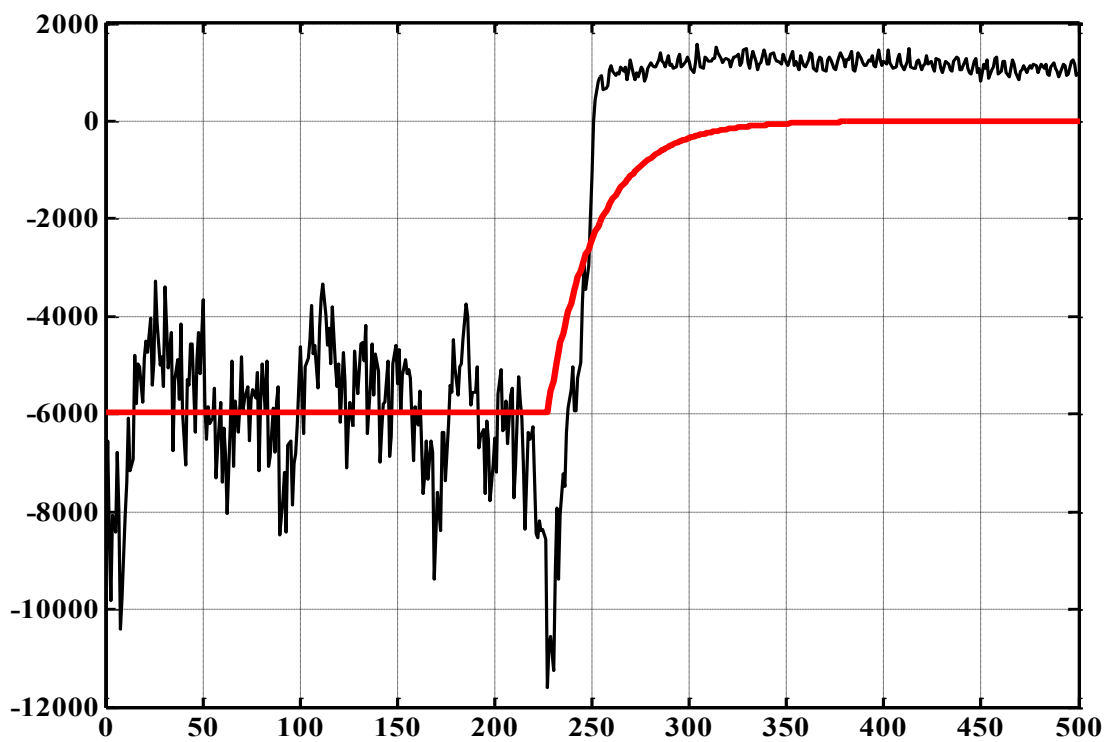


Рис. Д18 Экспериментальные и модельные результаты напряженности ЭСП, серия 4, опыт 1,
модель № 1

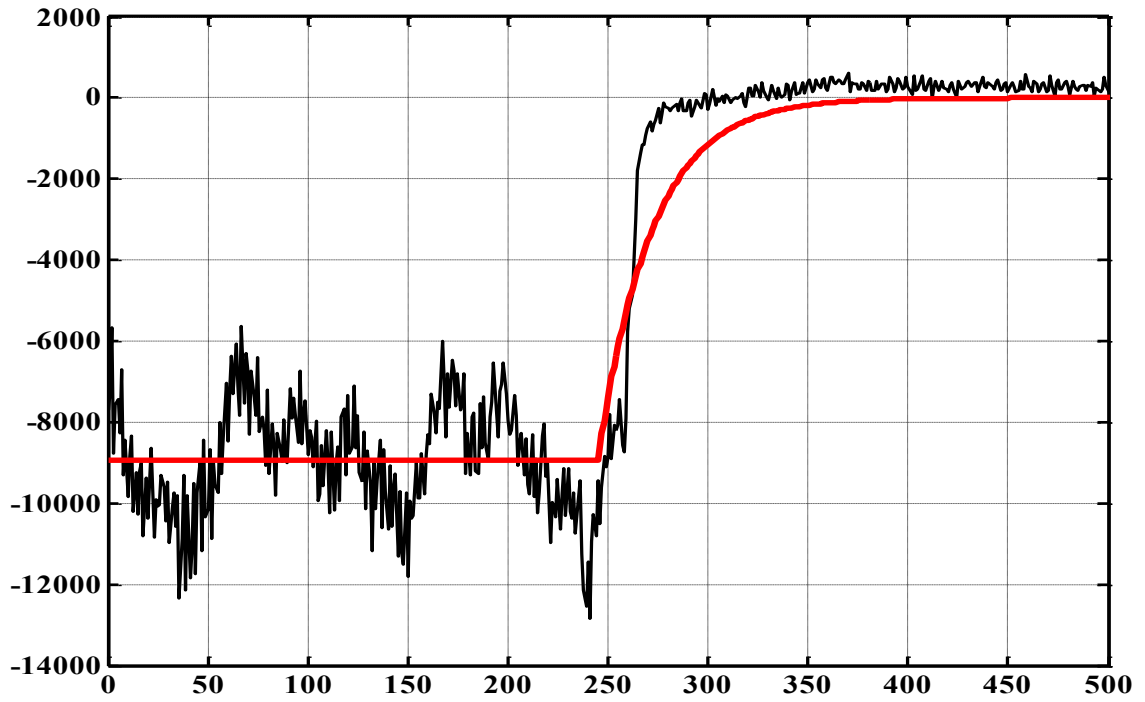


Рис. Д19 Экспериментальные и модельные результаты напряженности ЭСП, серия 4, опыт 1,
модель № 2

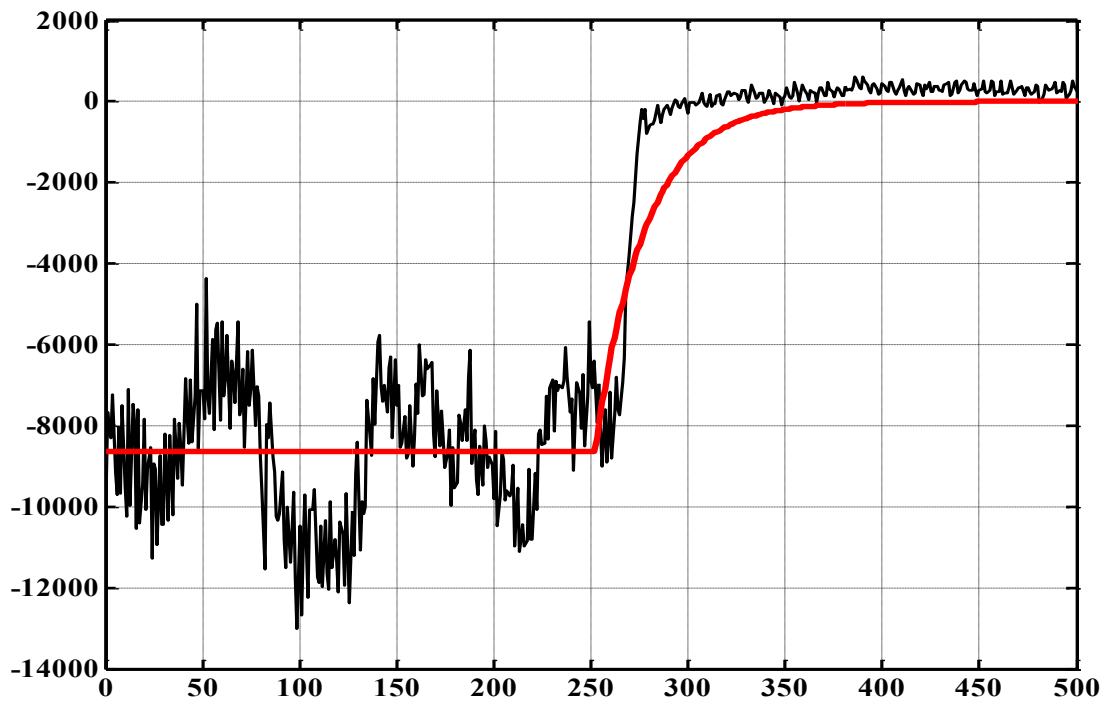


Рис. Д20 Экспериментальные и модельные результаты напряженности ЭСП, серия 4, опыт 1,
модель № 3

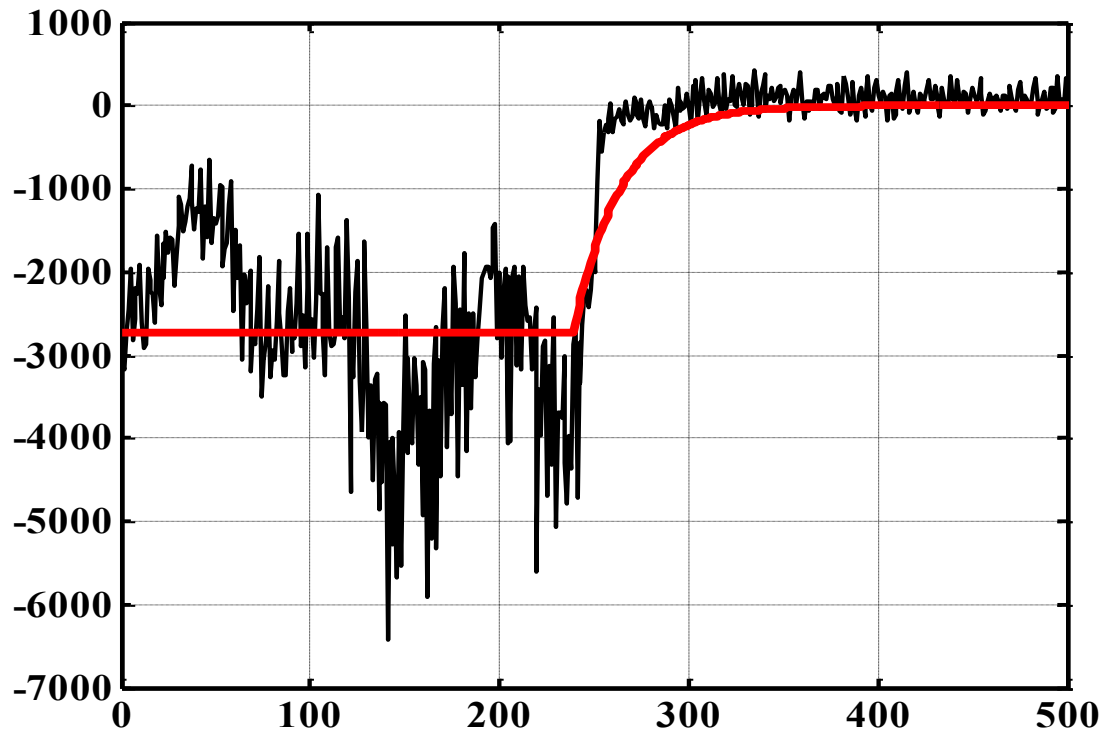


Рис. Д21 Экспериментальные и модельные результаты напряженности ЭСП, серия 4, опыт 2, модель № 1

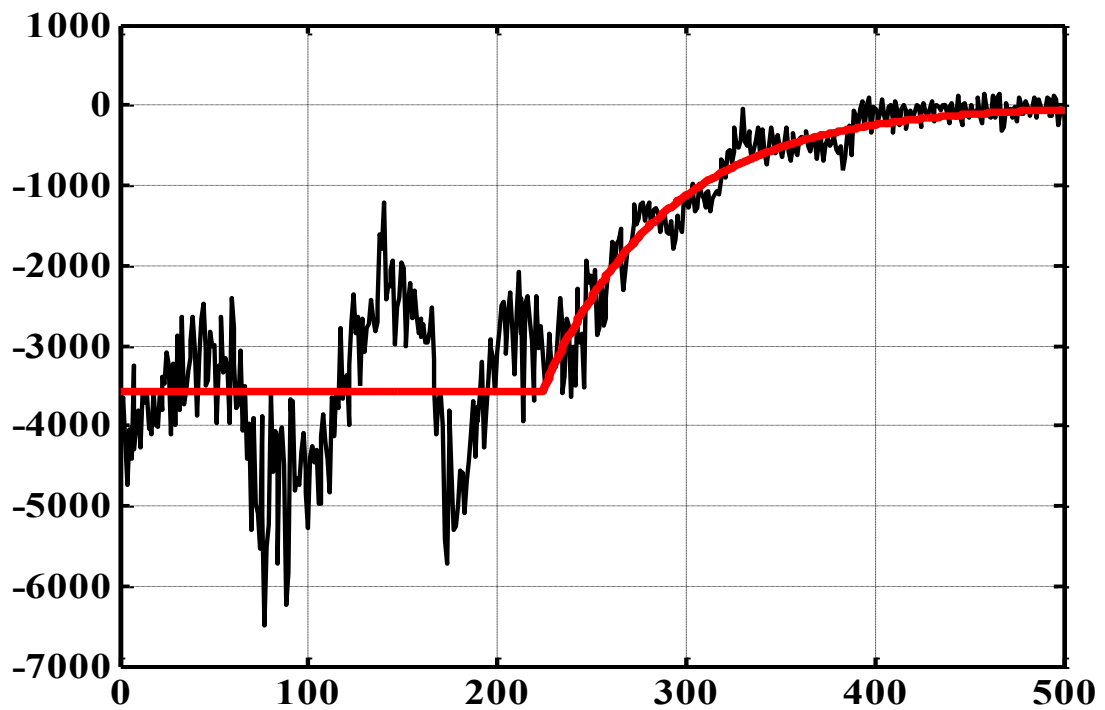


Рис. Д22 Экспериментальные и модельные результаты напряженности ЭСП, серия 4, опыт 2, модель № 2

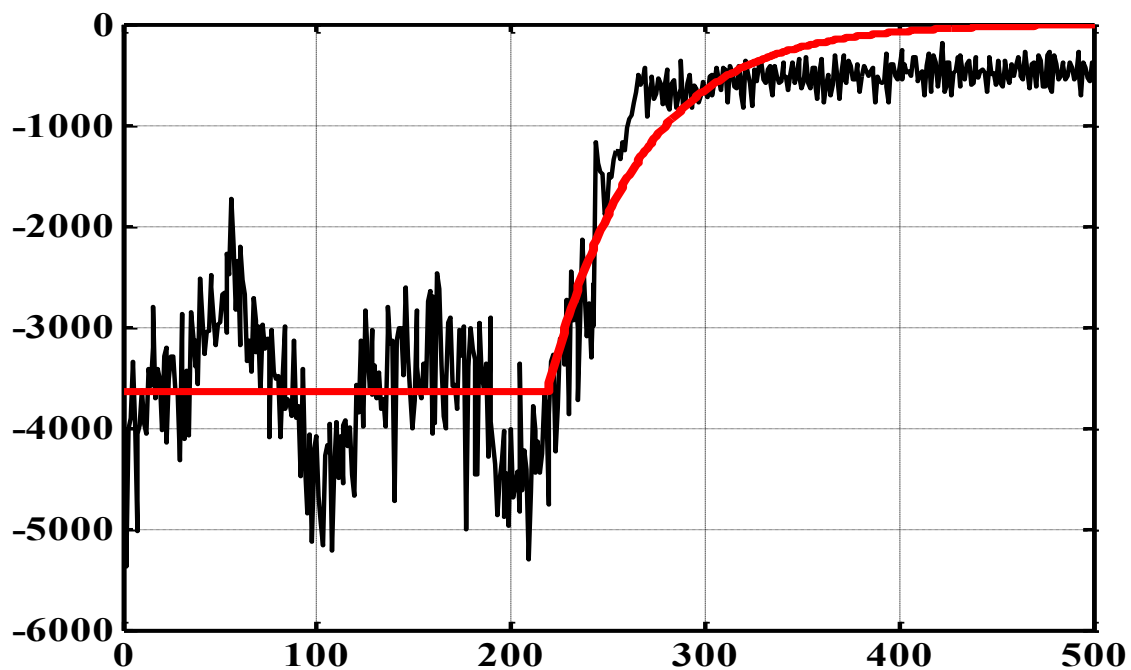


Рис. Д23 Экспериментальные и модельные результаты напряженности ЭСП, серия 4, опыт 2, модель № 3

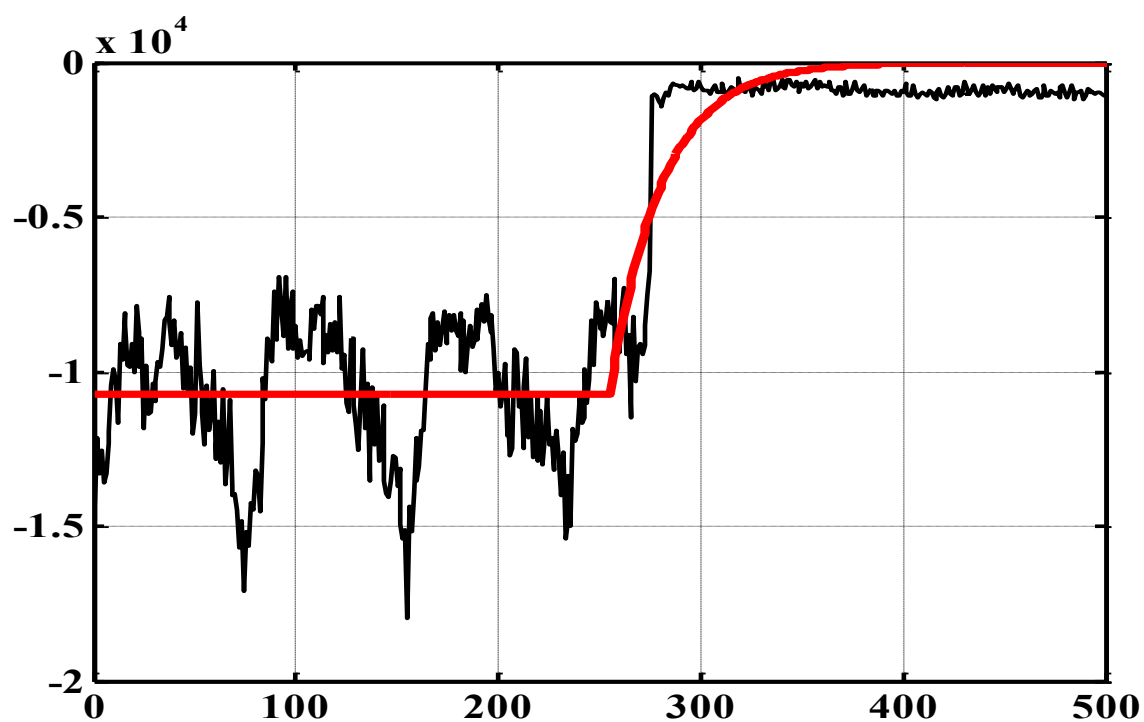


Рис. Д24 Экспериментальные и модельные результаты напряженности ЭСП, серия 4, опыт 3, модель № 1

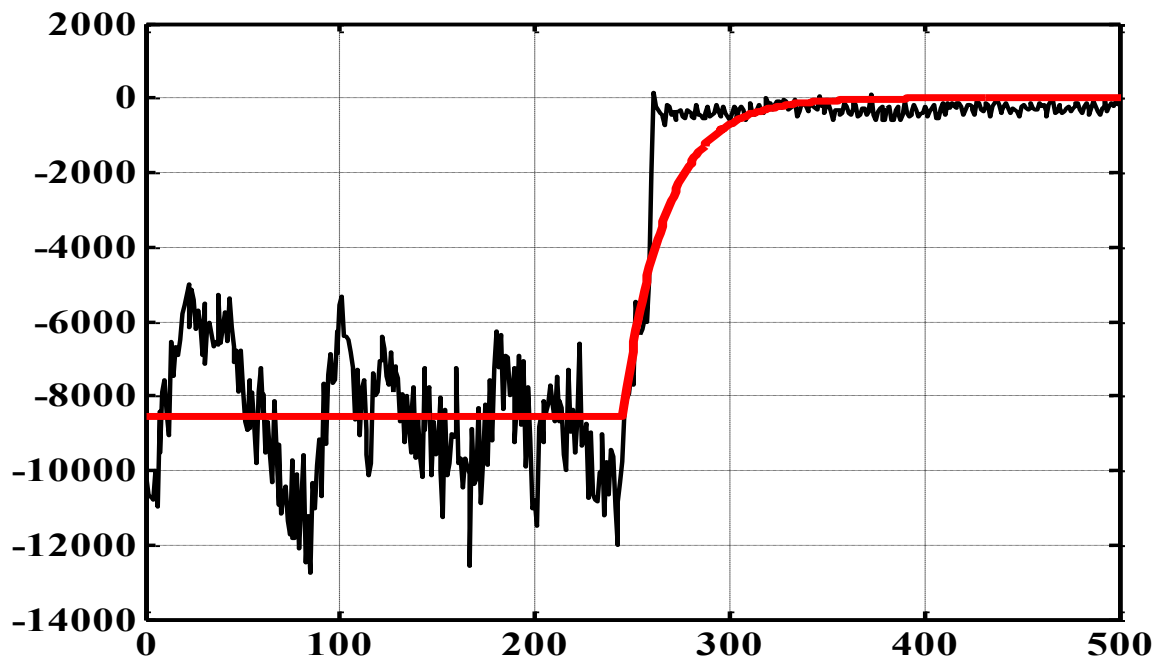


Рис. Д25 Экспериментальные и модельные результаты напряженности ЭСП, серия 4, опыт 3,
модель № 2

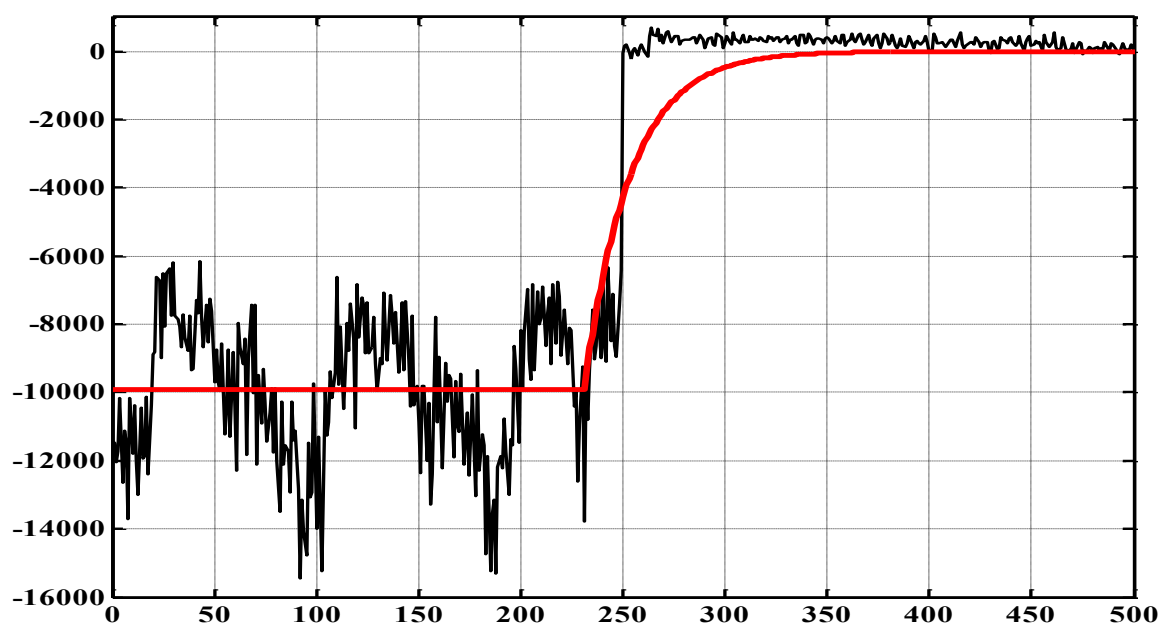


Рис. Д26 Экспериментальные и модельные результаты напряженности ЭСП, серия 4, опыт 3,
модель № 3

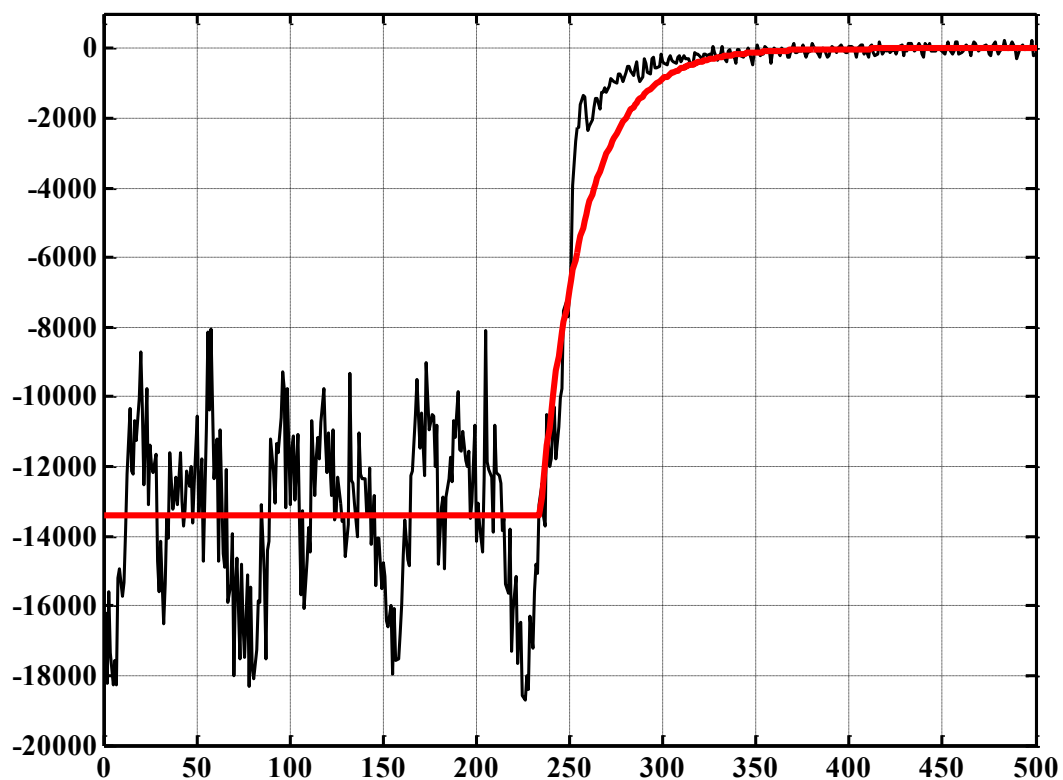


Рис. Д27 Экспериментальные и модельные результаты напряженности ЭСП, серия 5, опыт 1,
модель № 1

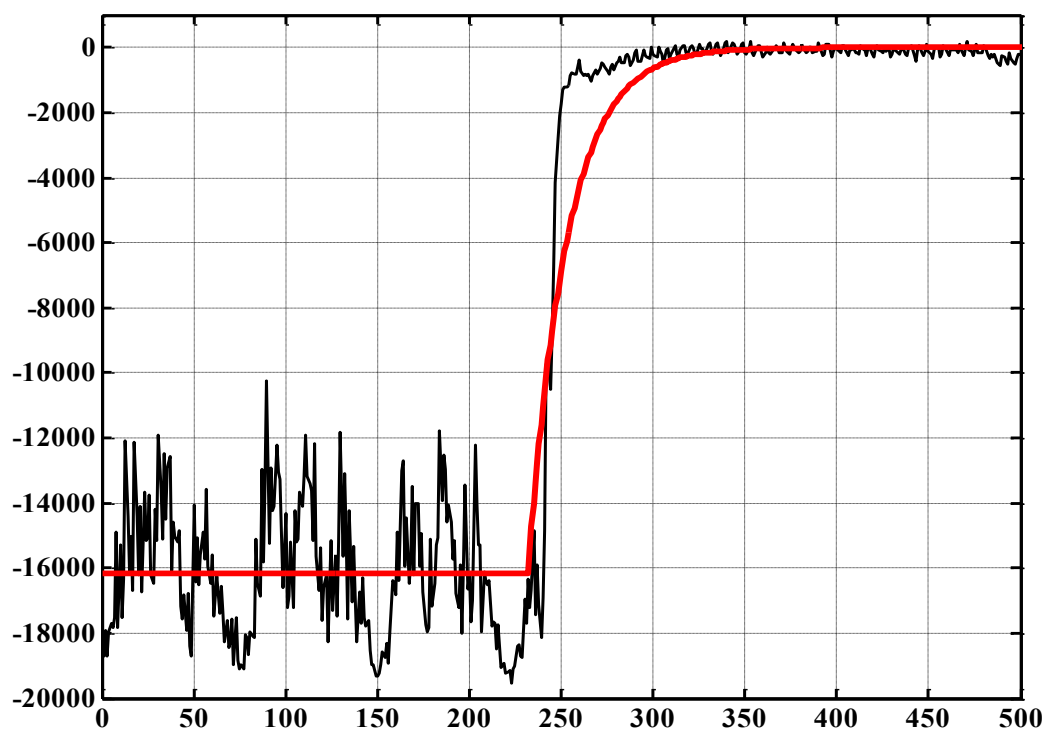


Рис. Д28 Экспериментальные и модельные результаты напряженности ЭСП, серия 5, опыт 1,
модель № 2

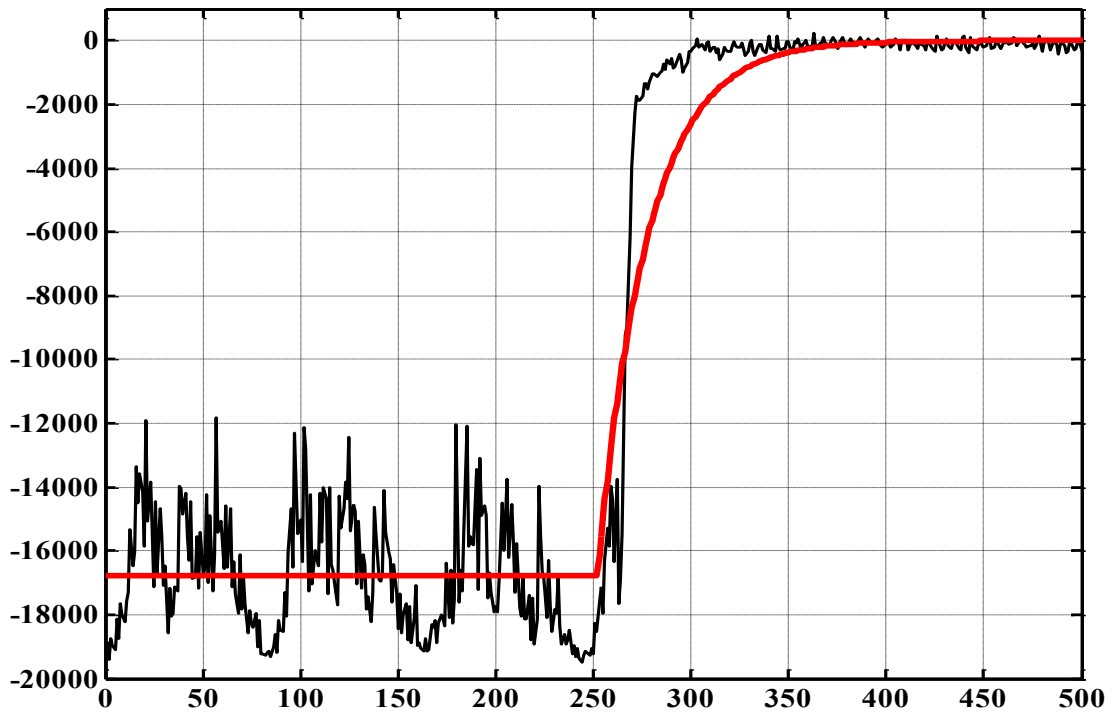


Рис. Д29 Экспериментальные и модельные результаты напряженности ЭСП, серия 5, опыт 1,
модель № 3

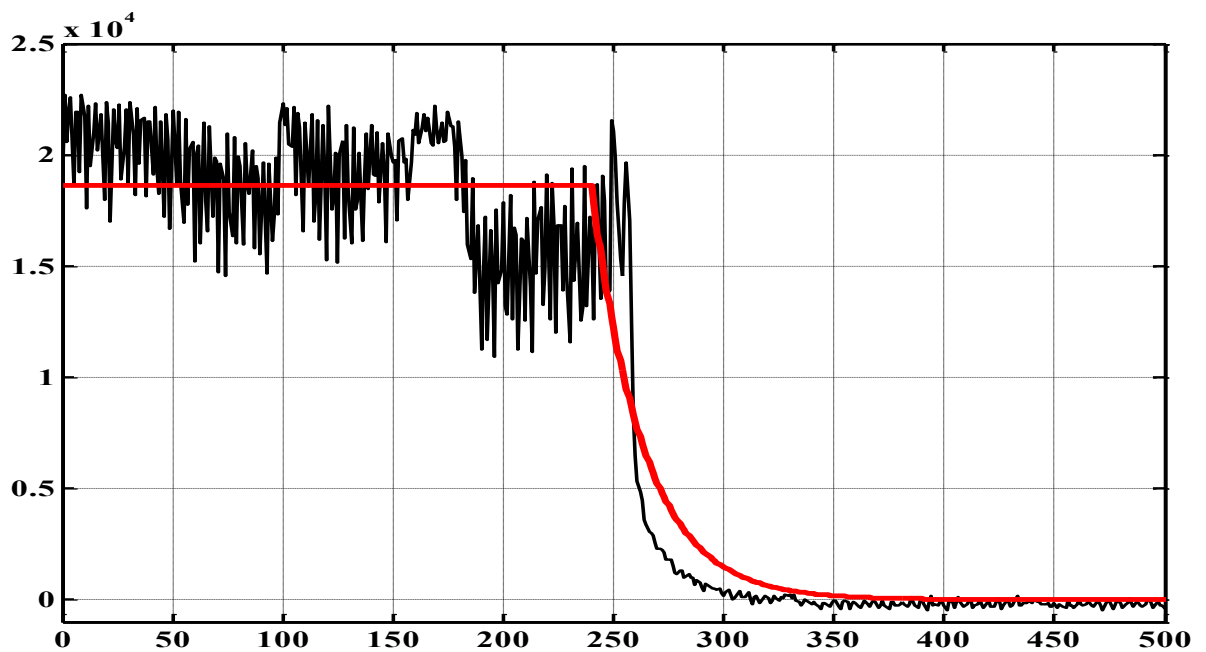


Рис. Д30 Экспериментальные и модельные результаты напряженности ЭСП, серия 5, опыт 2,
модель № 1

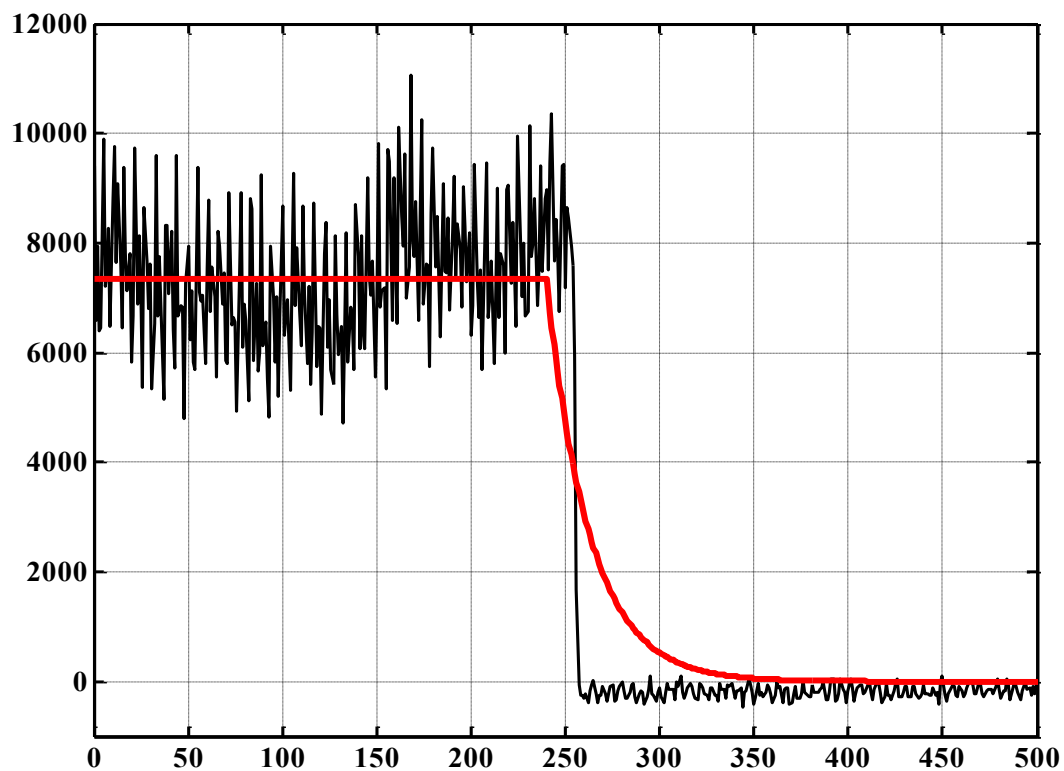


Рис. Д31 Экспериментальные и модельные результаты напряженности ЭСП, серия 5, опыт 2,
модель № 3

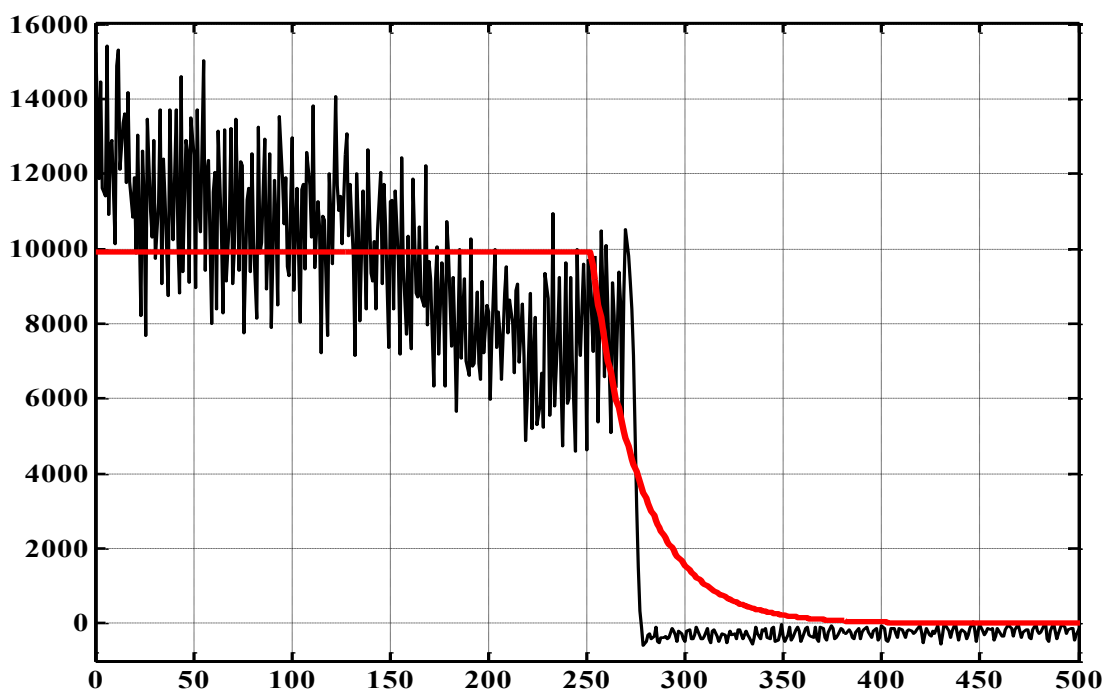


Рис. Д32 Экспериментальные и модельные результаты напряженности ЭСП, серия 5, опыт 2,
модель № 3

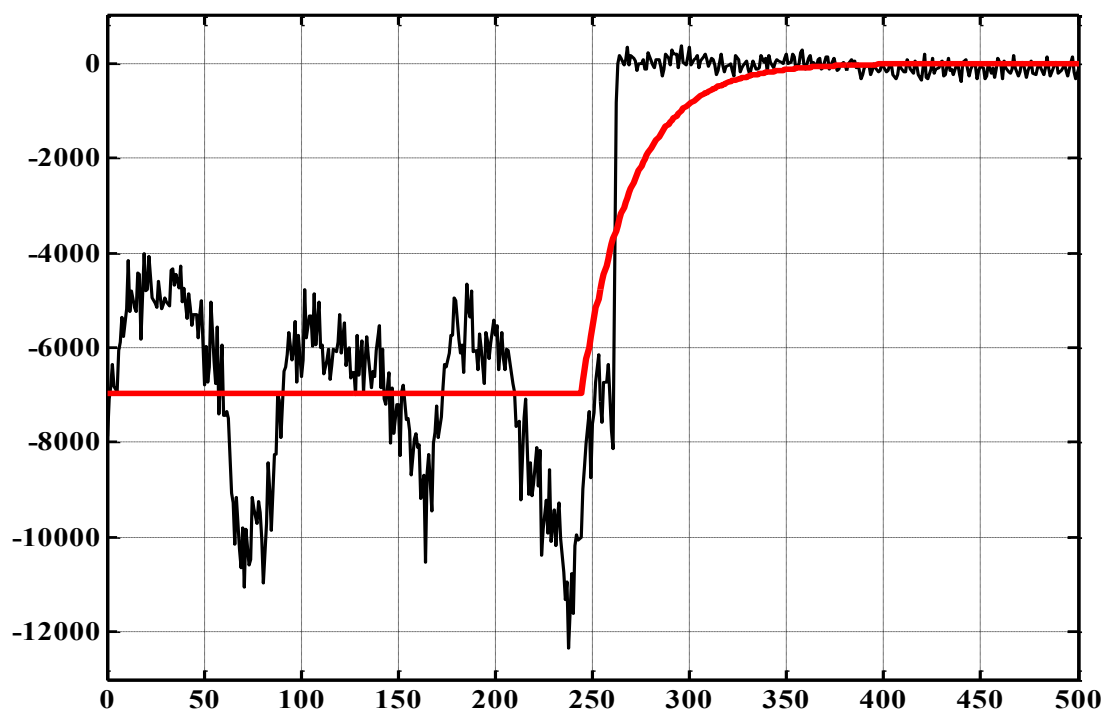


Рис. Д33 Экспериментальные и модельные результаты напряженности ЭСП, серия 5, опыт 3,
модель № 1

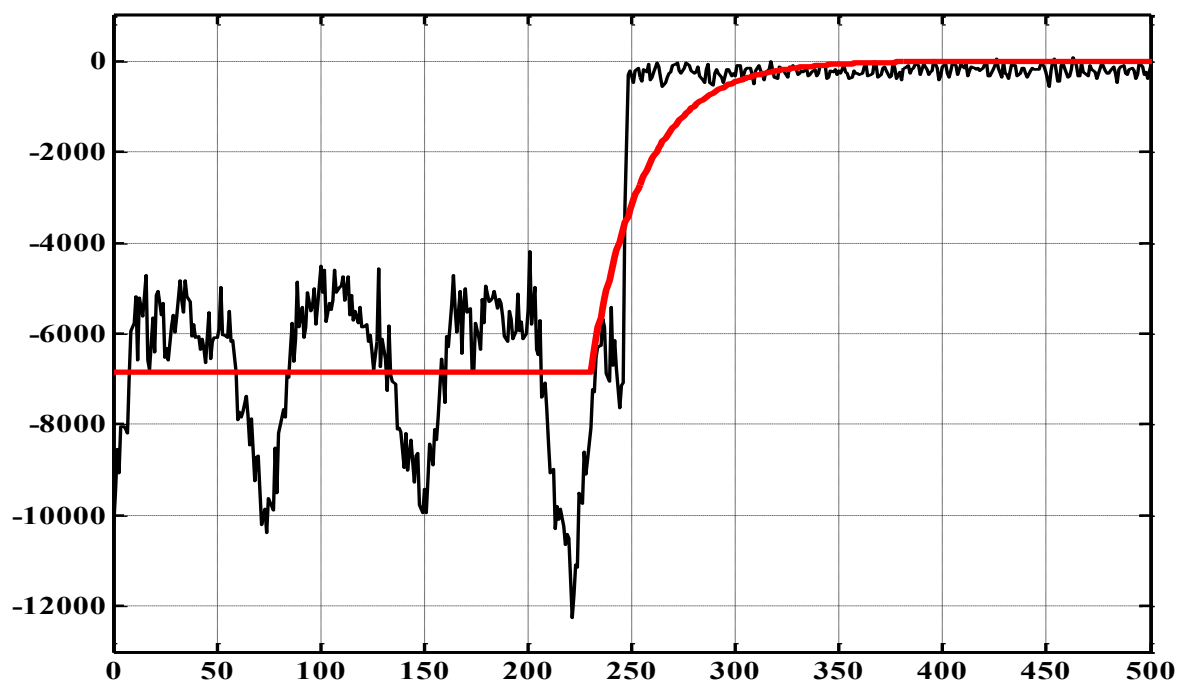


Рис. Д34 Экспериментальные и модельные результаты напряженности ЭСП, серия 5, опыт 3,
модель № 2



Рис. Д35 Экспериментальные и модельные результаты напряженности ЭСП, серия 5, опыт 3,
модель № 3

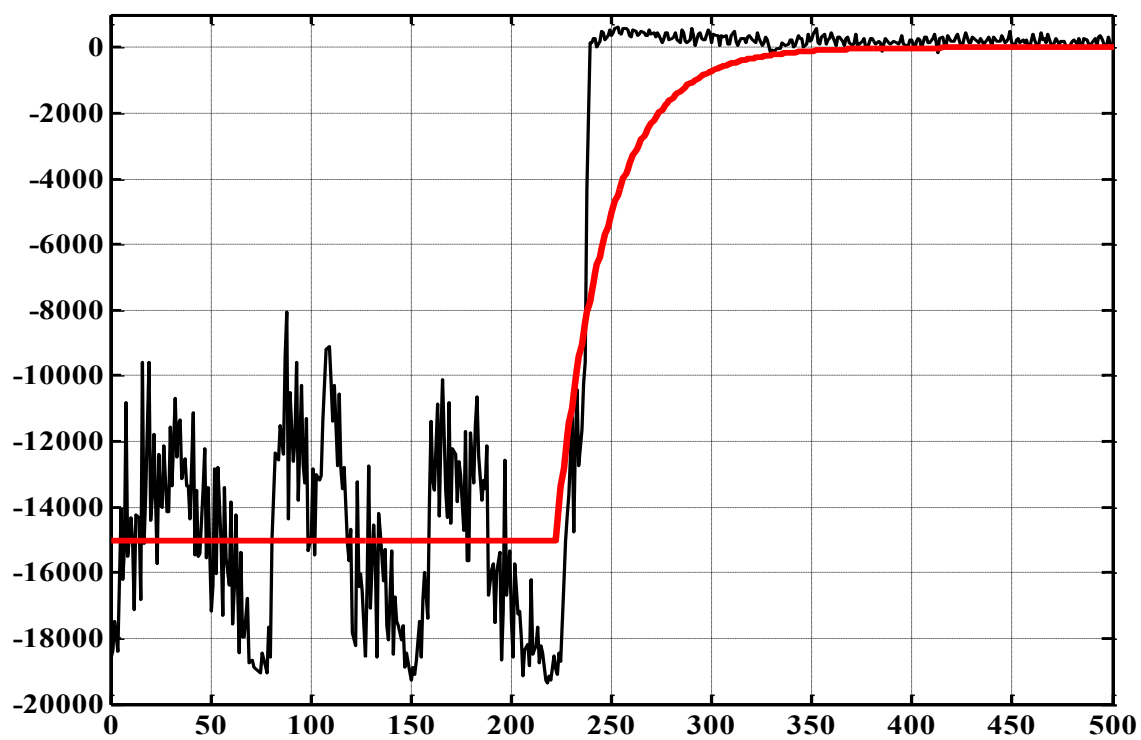


Рис. Д36 Экспериментальные и модельные результаты напряженности ЭСП, серия 5, опыт 4,
модель № 1

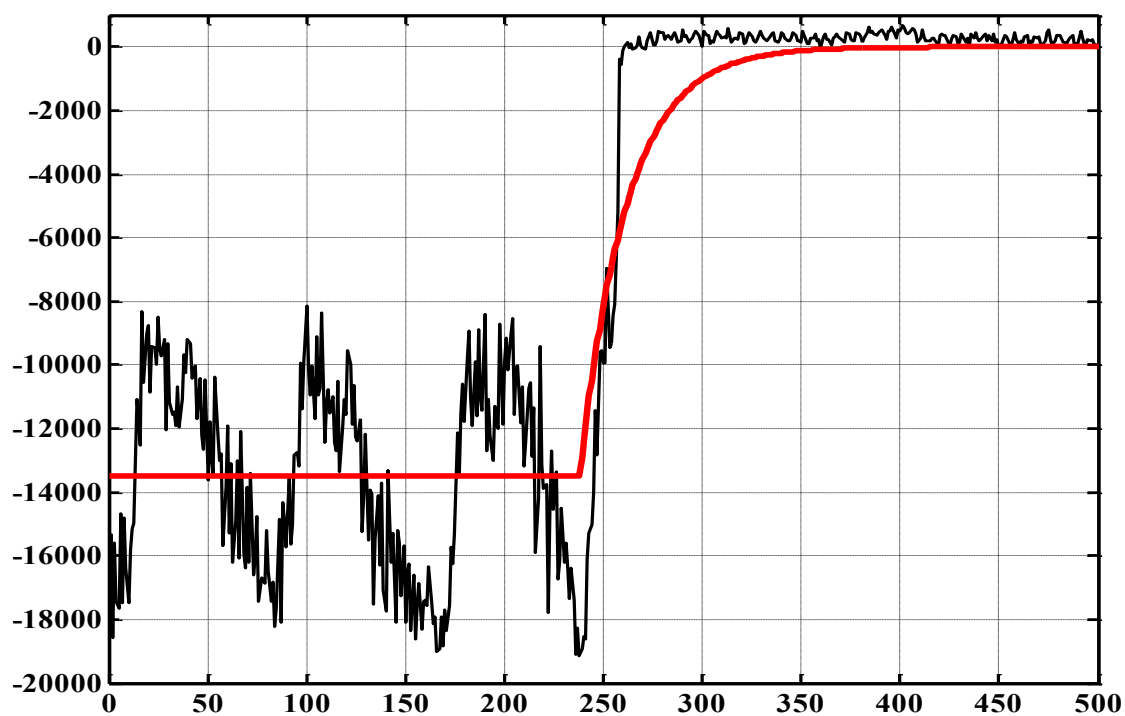


Рис. Д37 Экспериментальные и модельные результаты напряженности ЭСП, серия 5, опыт 4,
модель № 2

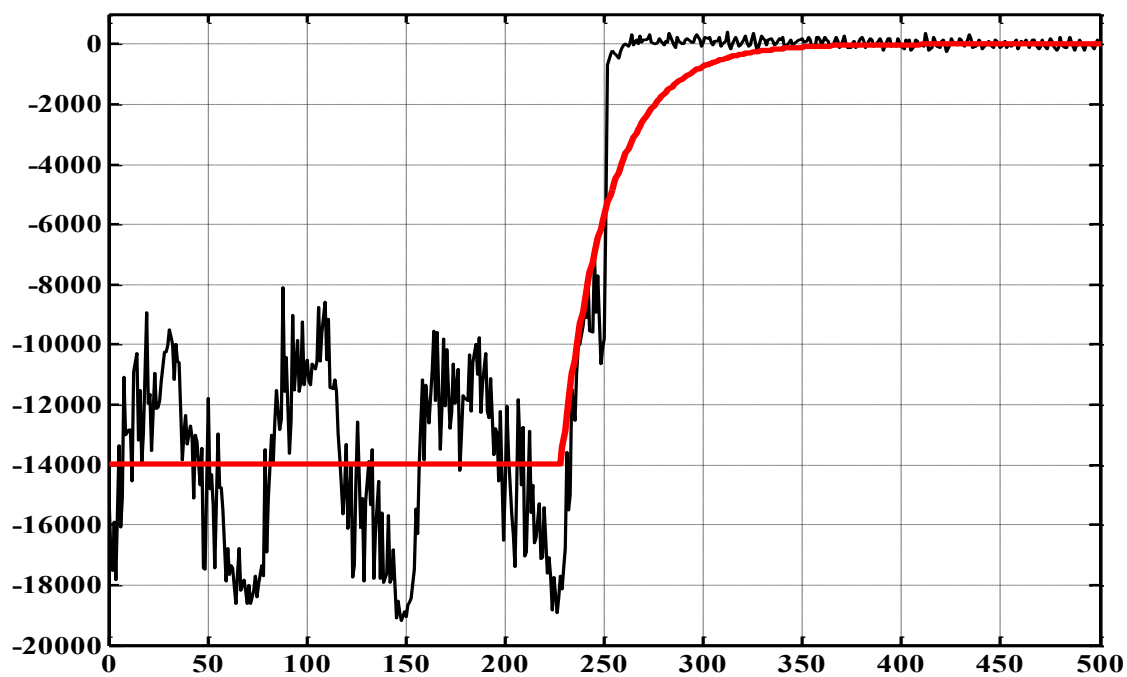


Рис. Д38 Экспериментальные и модельные результаты напряженности ЭСП, серия 5, опыт 4,
модель № 3

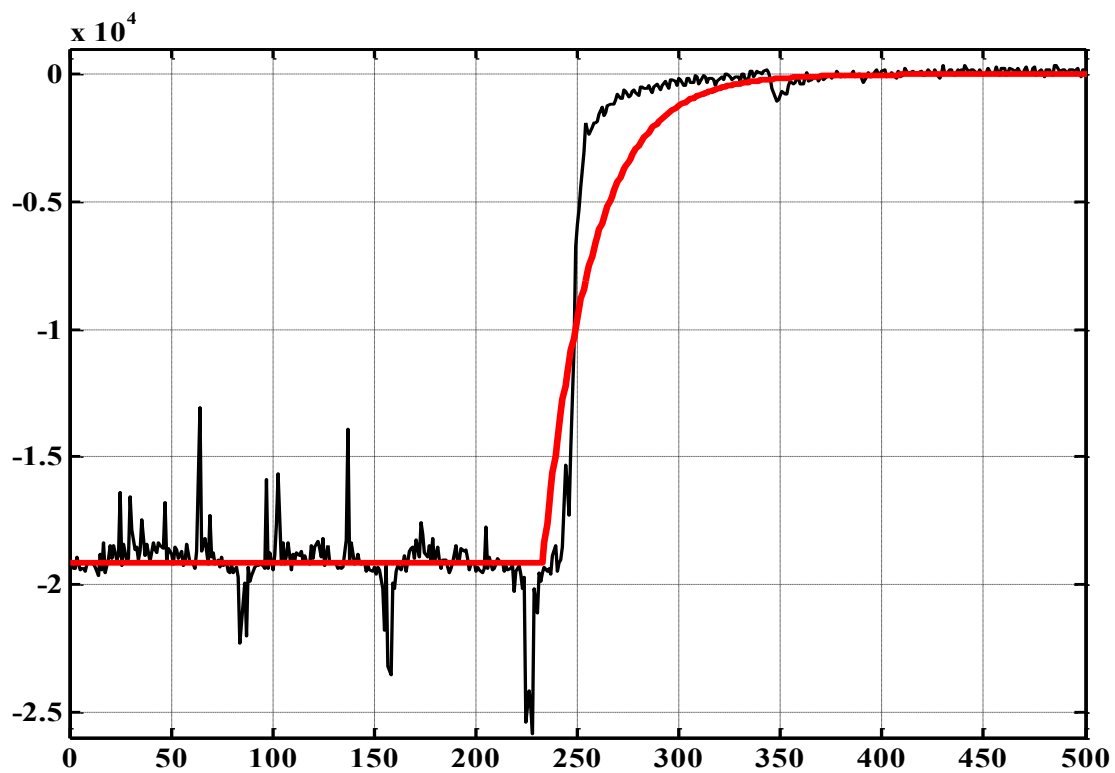


Рис. Д39 Экспериментальные и модельные результаты напряженности ЭСП, серия 6, опыт 1,
модель № 1

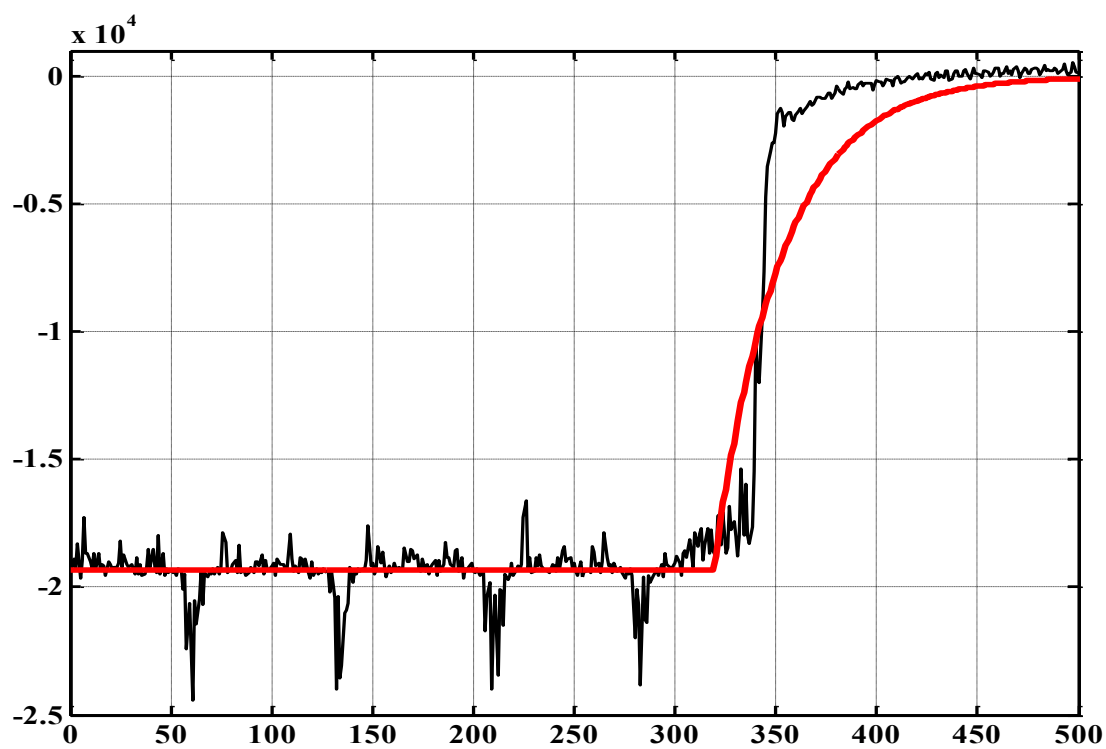


Рис. Д40 Экспериментальные и модельные результаты напряженности ЭСП, серия 6, опыт 1,
модель № 2

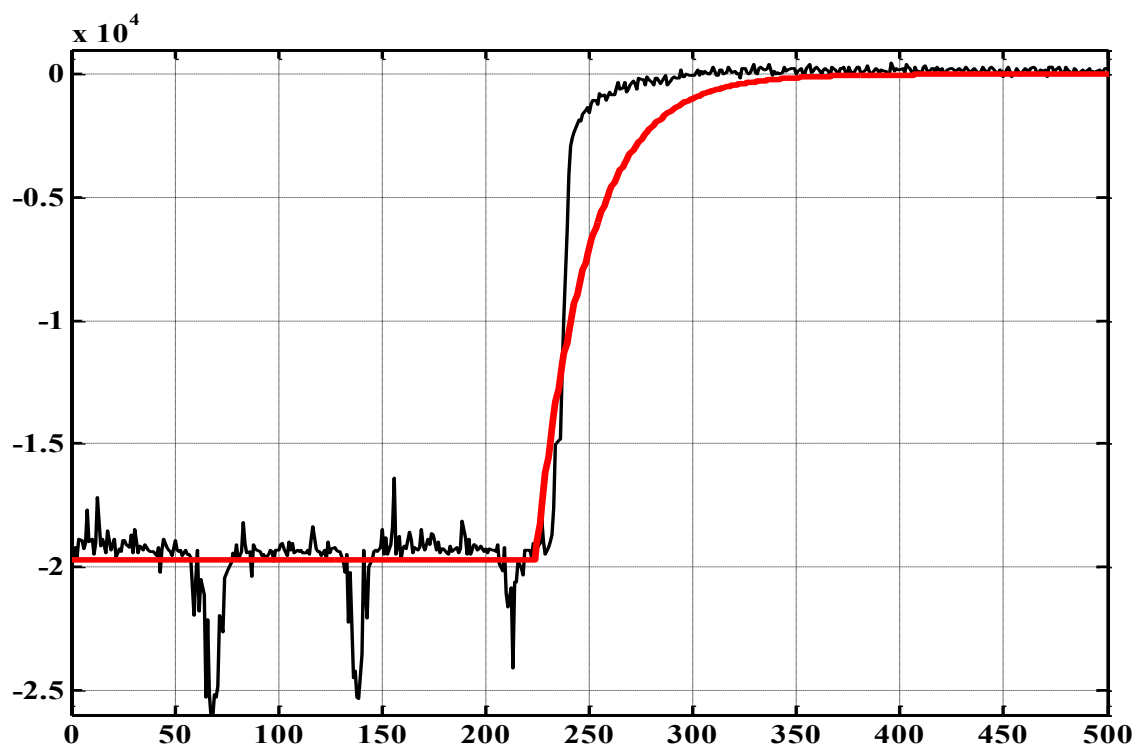


Рис. Д41 Экспериментальные и модельные результаты напряженности ЭСП, серия 6, опыт 1,
модель № 3

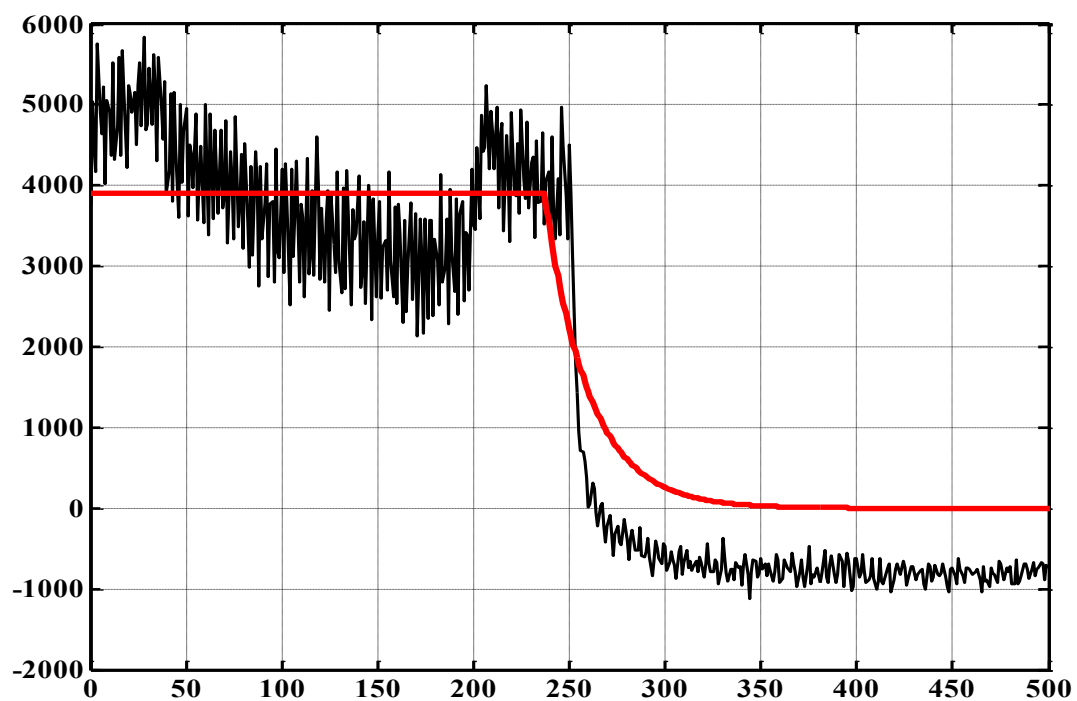


Рис. Д42 Экспериментальные и модельные результаты напряженности ЭСП, серия 6, опыт 2,
модель № 1

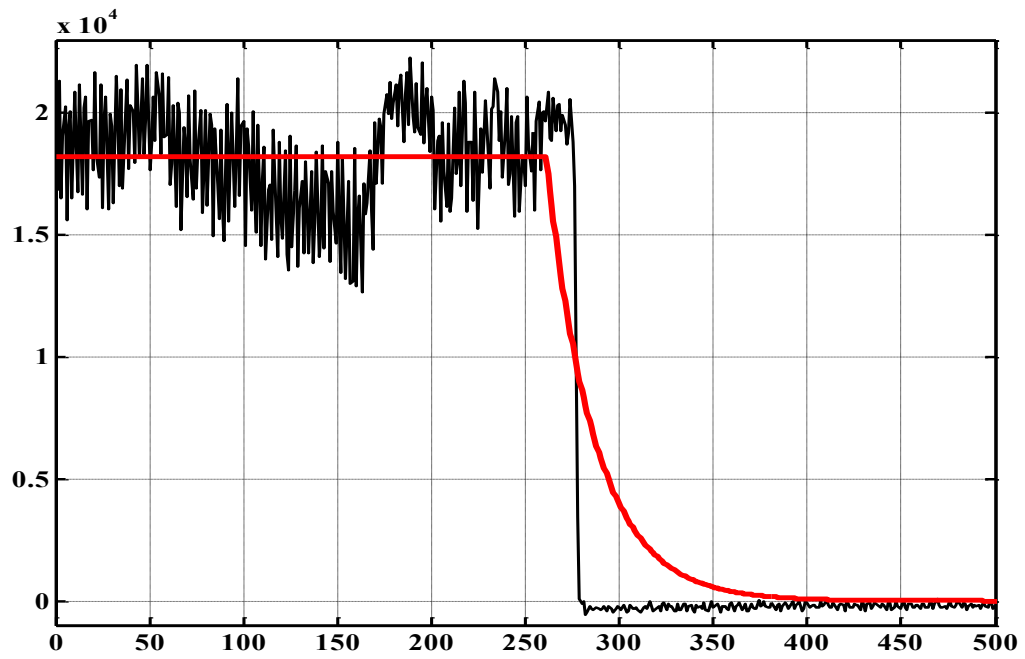


Рис. Д43 Экспериментальные и модельные результаты напряженности ЭСП, серия 6, опыт 2,
модель № 2

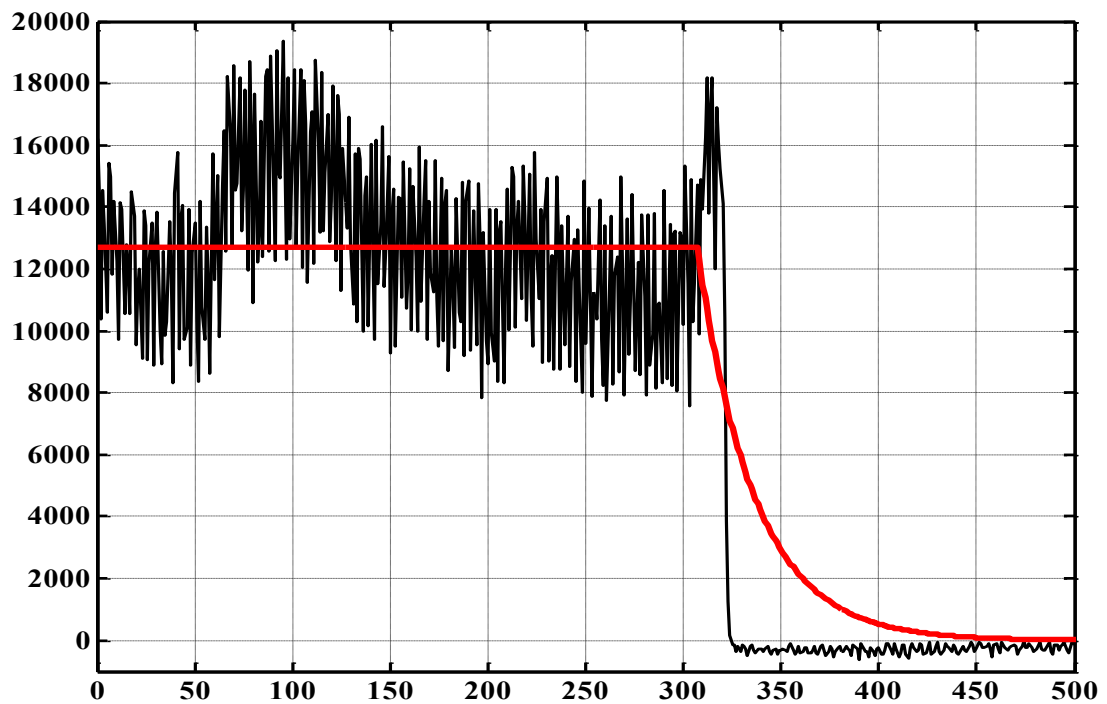


Рис. Д44 Экспериментальные и модельные результаты напряженности ЭСП, серия 6, опыт 2,
модель № 3

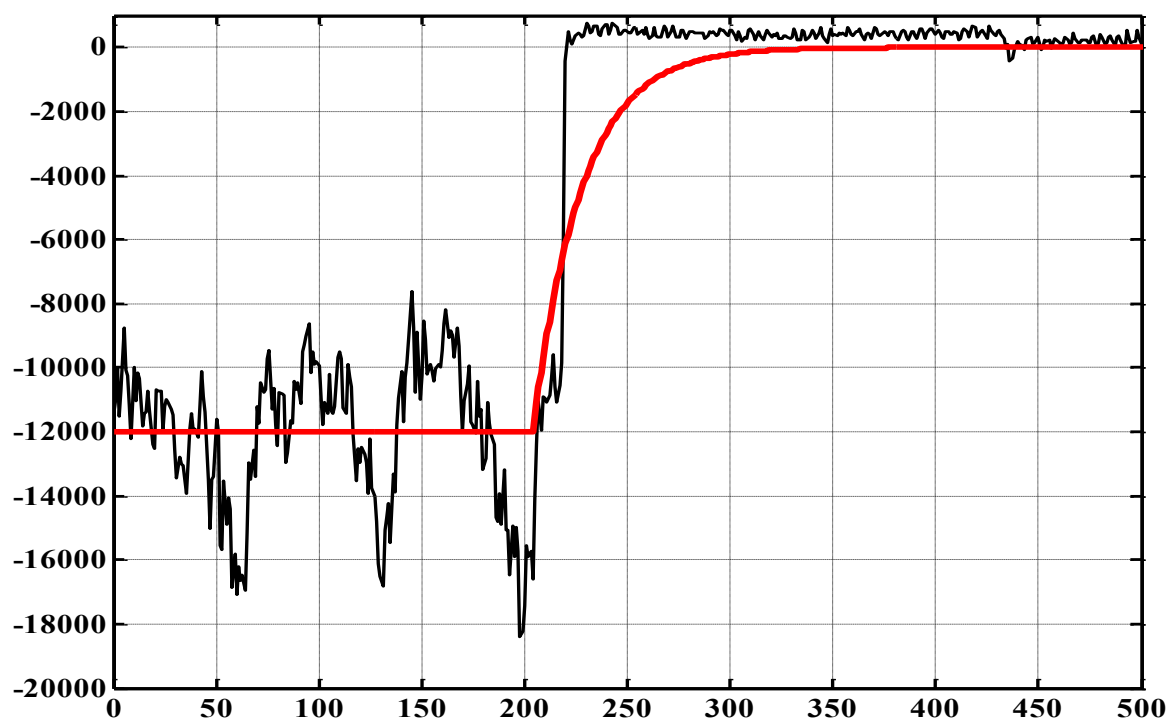


Рис. Д45 Экспериментальные и модельные результаты напряженности ЭСП, серия 6, опыт 3,
модель № 1

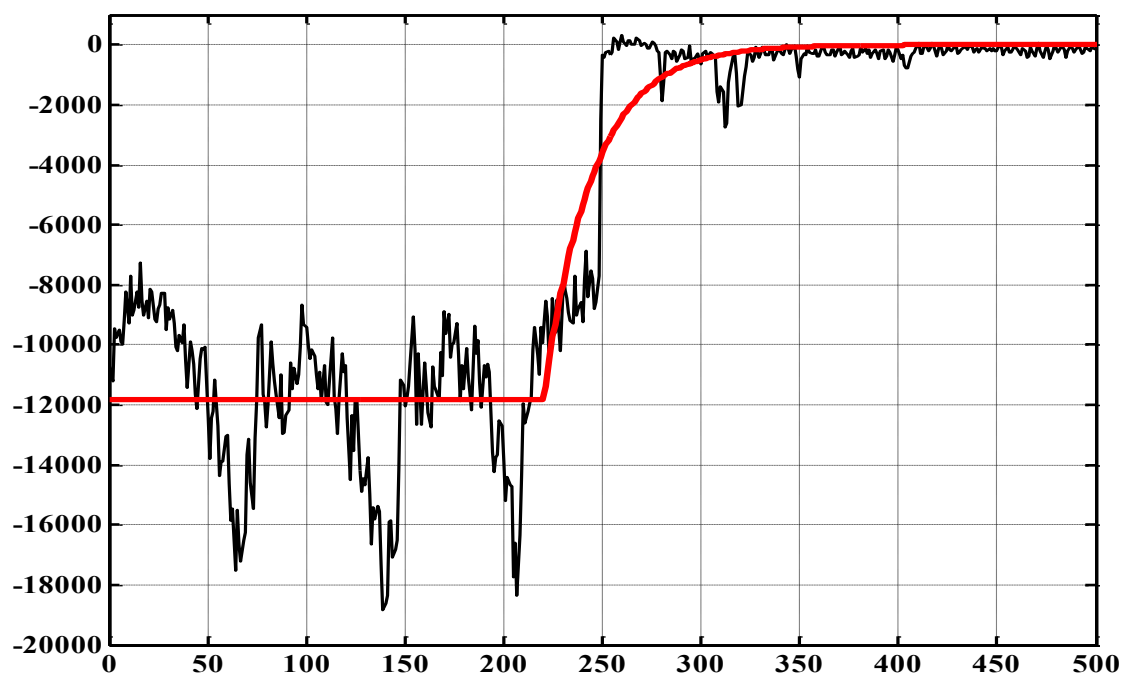


Рис. Д46 Экспериментальные и модельные результаты напряженности ЭСП, серия 6, опыт 3,
модель № 2

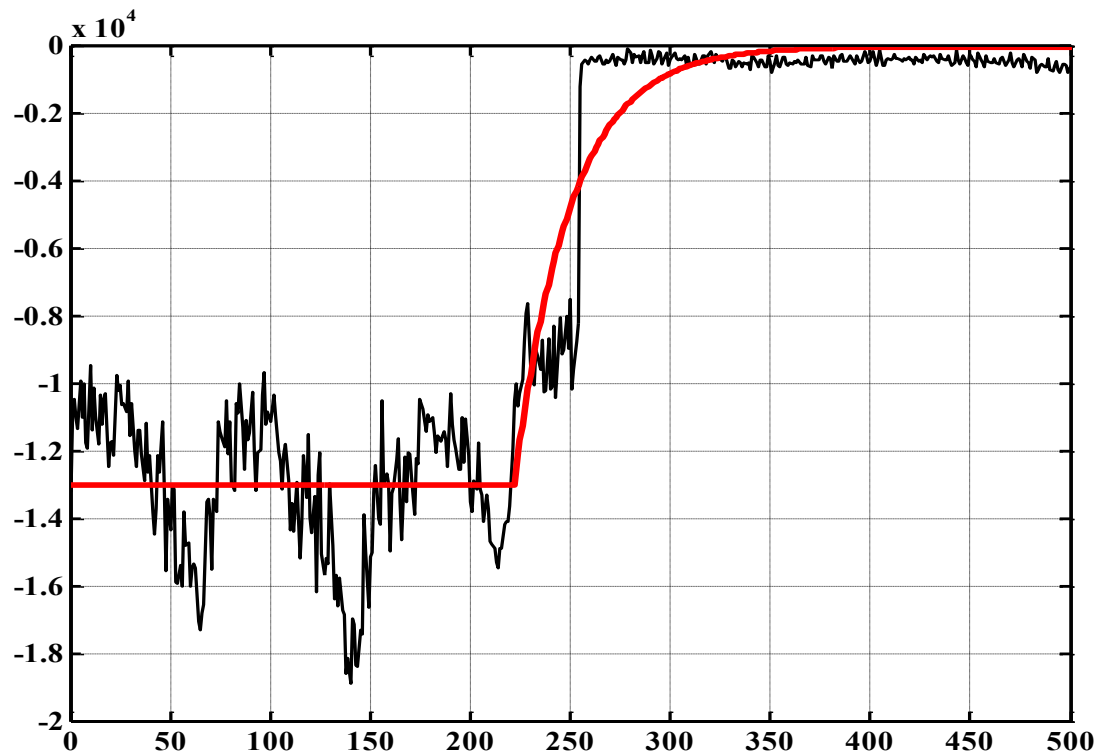


Рис. Д47 Экспериментальные и модельные результаты напряженности ЭСП, серия 6, опыт 3,
модель № 3

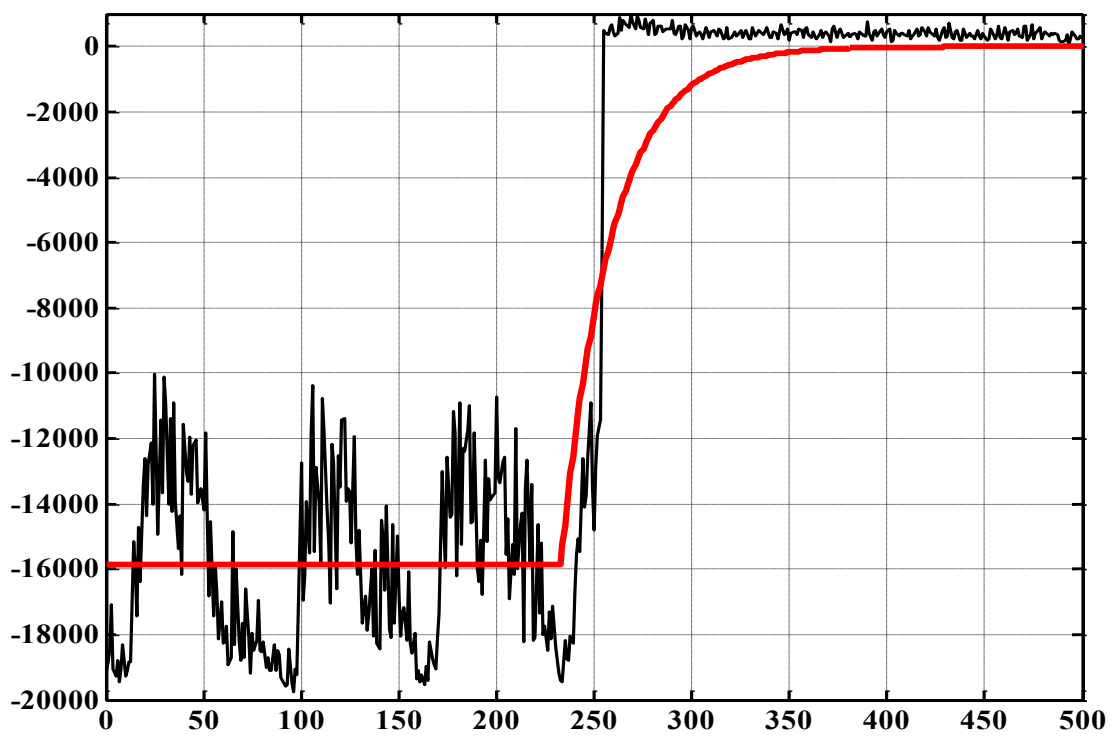


Рис. Д48 Экспериментальные и модельные результаты напряженности ЭСП, серия 6, опыт 4,
модель № 1

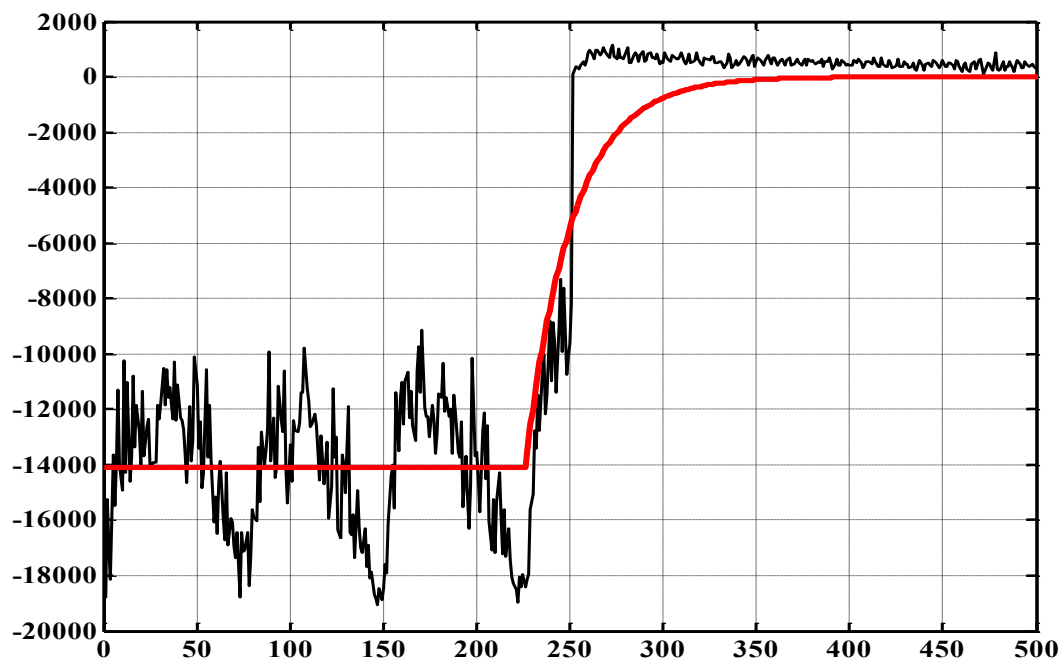


Рис. Д49 Экспериментальные и модельные результаты напряженности ЭСП, серия 6, опыт 4,
модель № 2

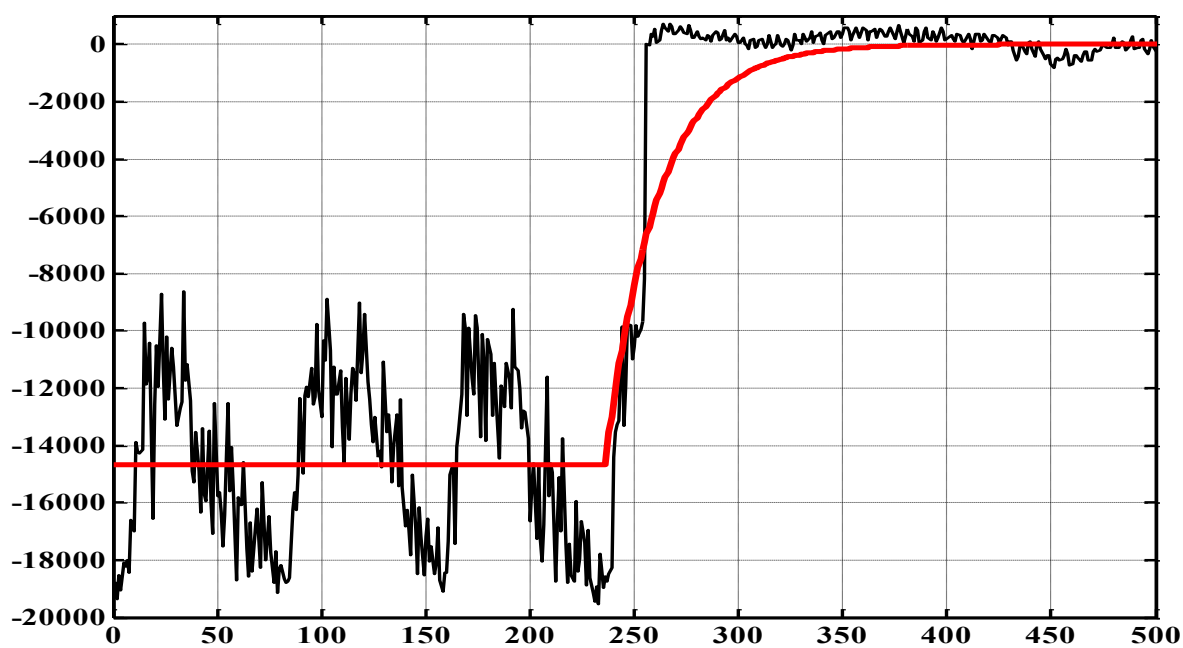


Рис. Д50 Экспериментальные и модельные результаты напряженности ЭСП, серия 6, опыт 4,
модель № 3

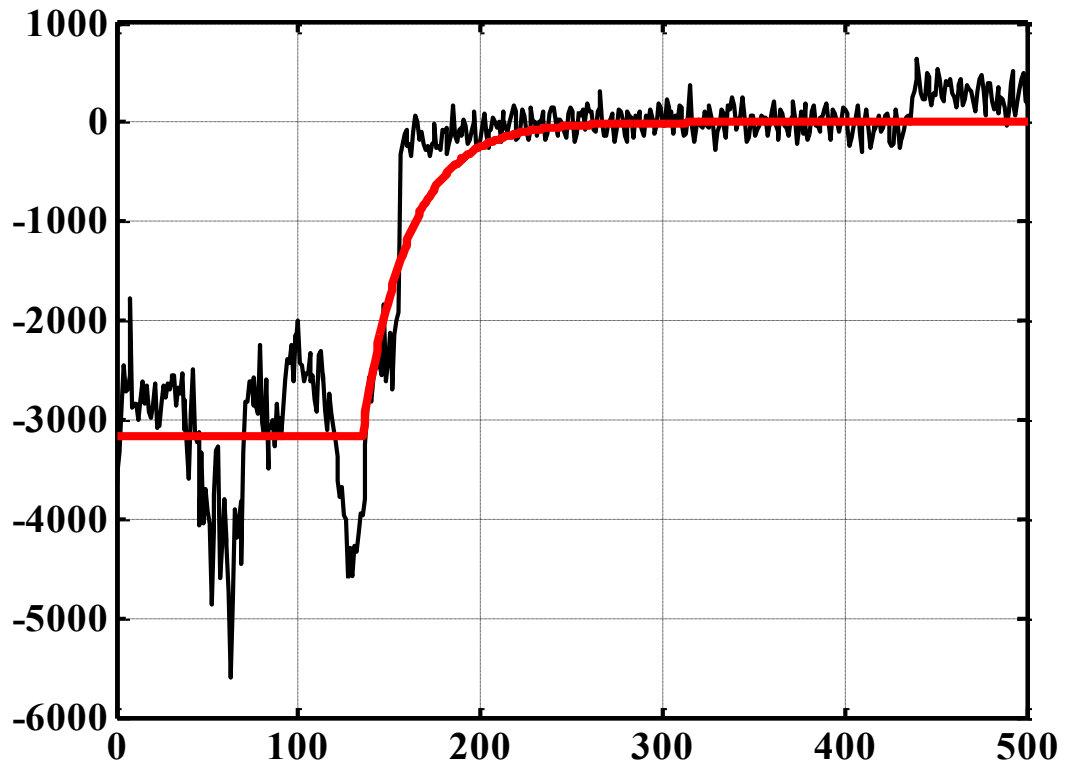


Рис. Д51 Экспериментальные и модельные результаты напряженности ЭСП, серия 7, опыт 1,
модель № 1

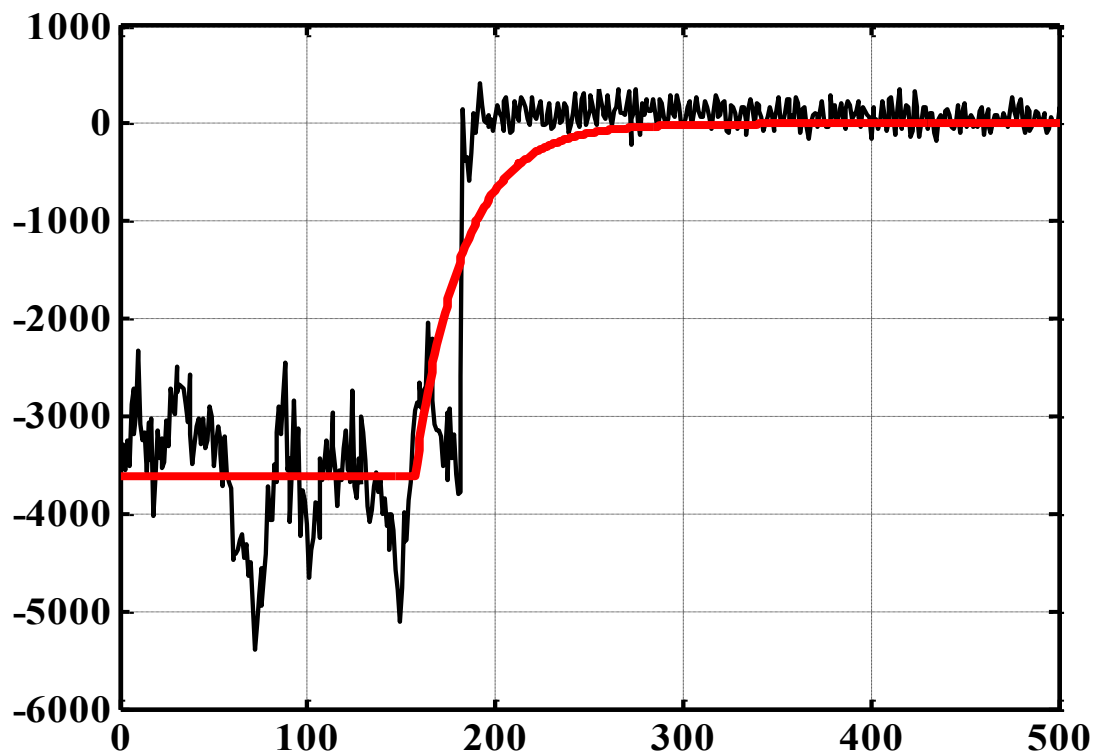


Рис. Д52 Экспериментальные и модельные результаты напряженности ЭСП, серия 7, опыт 1,
модель № 2

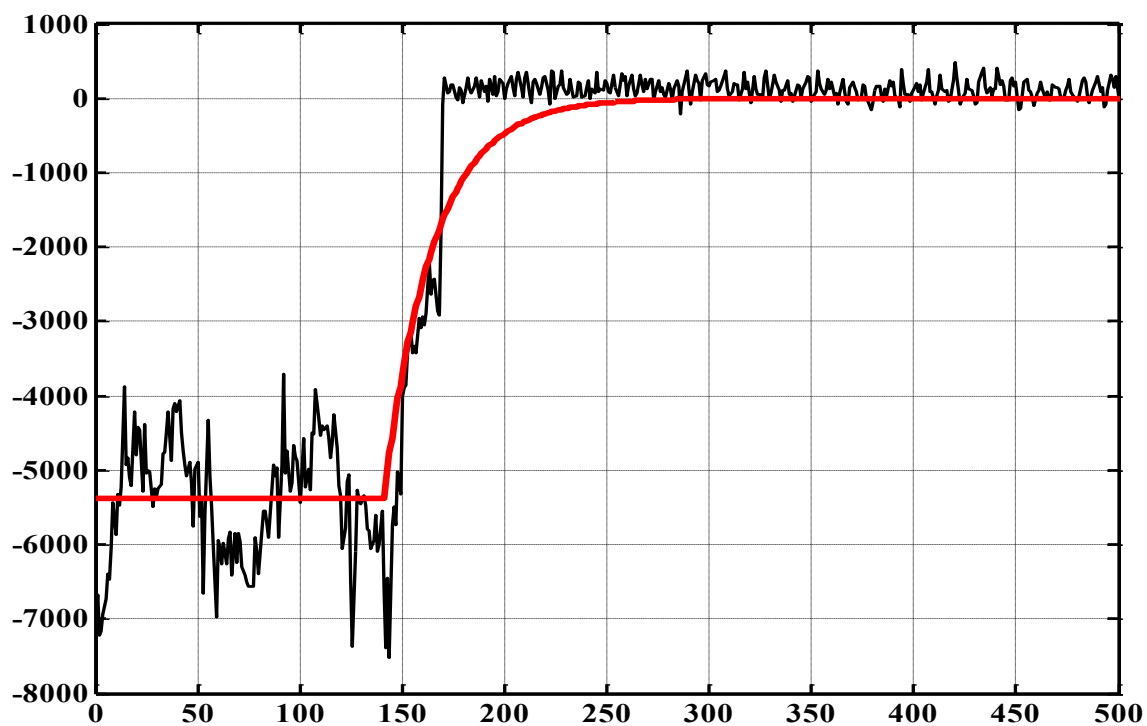


Рис. Д53 Экспериментальные и модельные результаты напряженности ЭСП, серия 7, опыт 1,
модель № 3

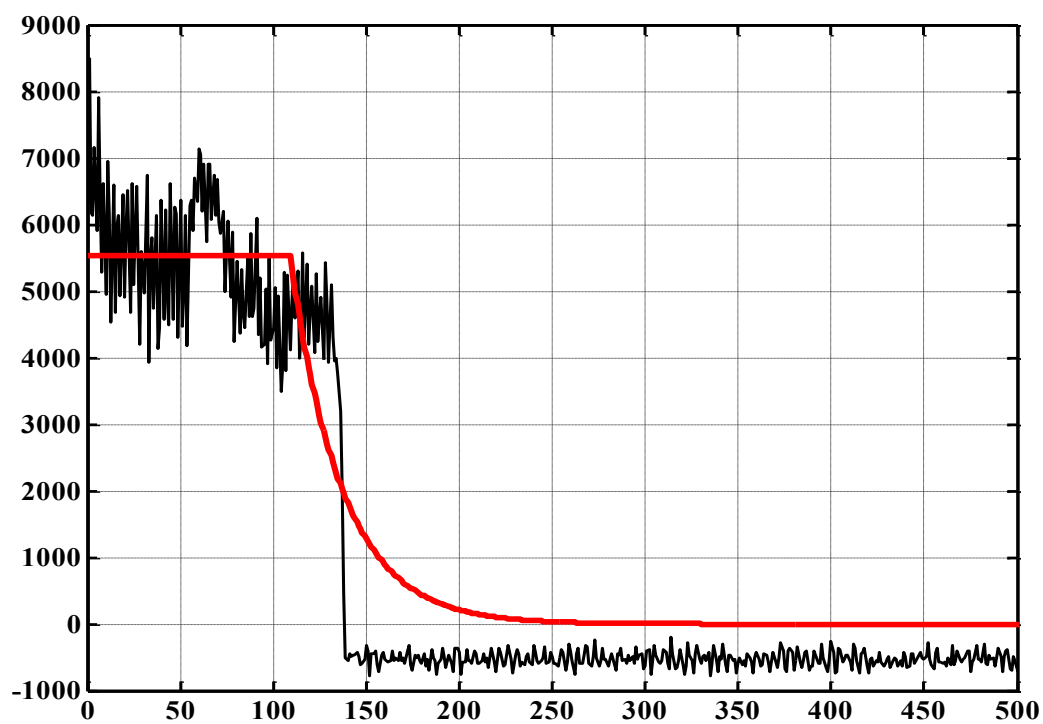


Рис. Д54 Экспериментальные и модельные результаты напряженности ЭСП, серия 7, опыт 2,
модель № 1

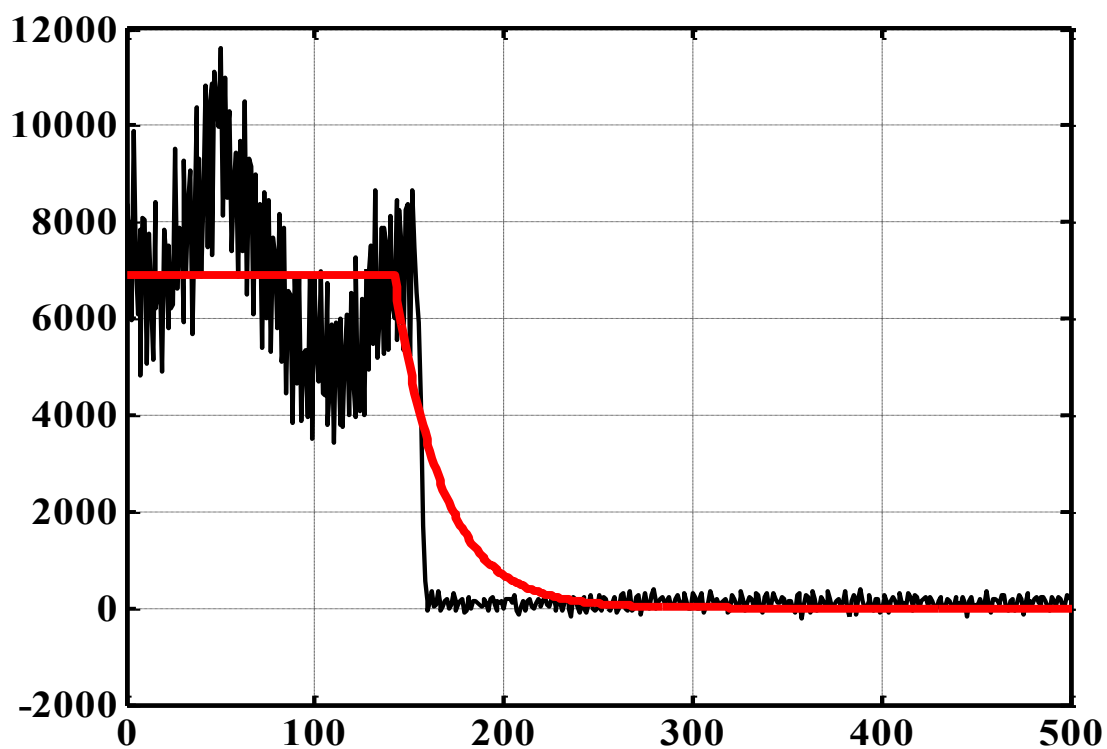


Рис. Д55 Экспериментальные и модельные результаты напряженности ЭСП, серия 7, опыт 2,
модель № 2

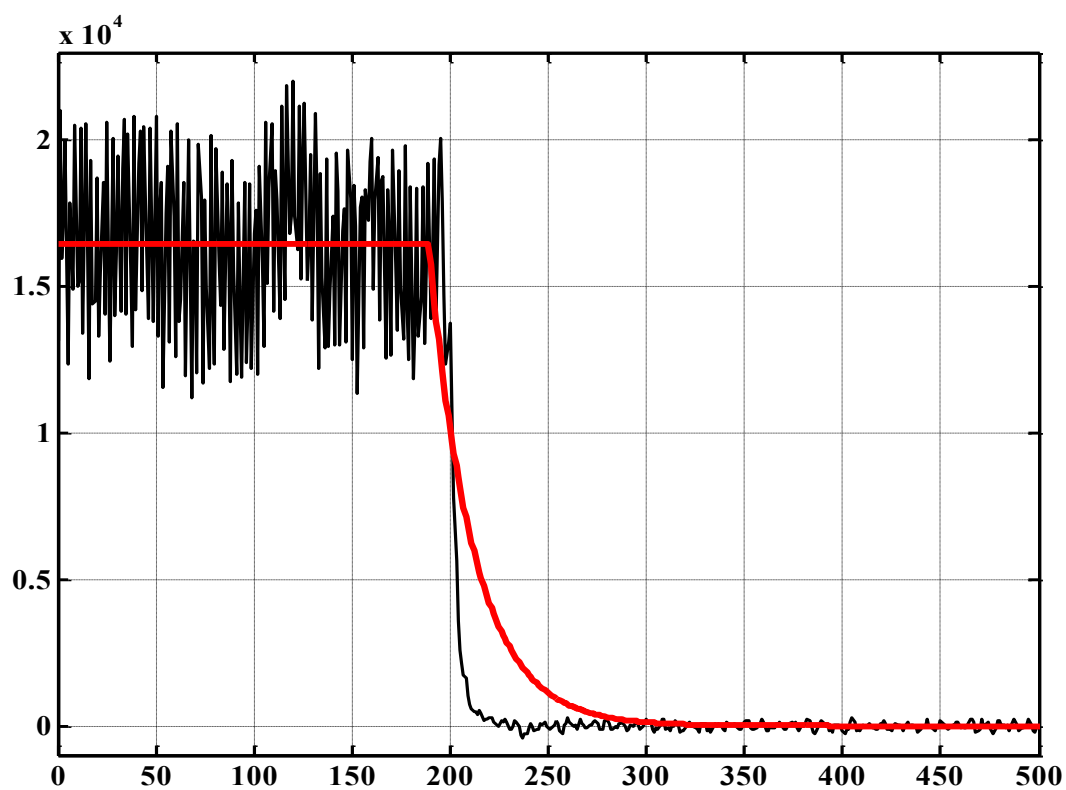


Рис. Д56 Экспериментальные и модельные результаты напряженности ЭСП, серия 7, опыт 2,
модель № 3

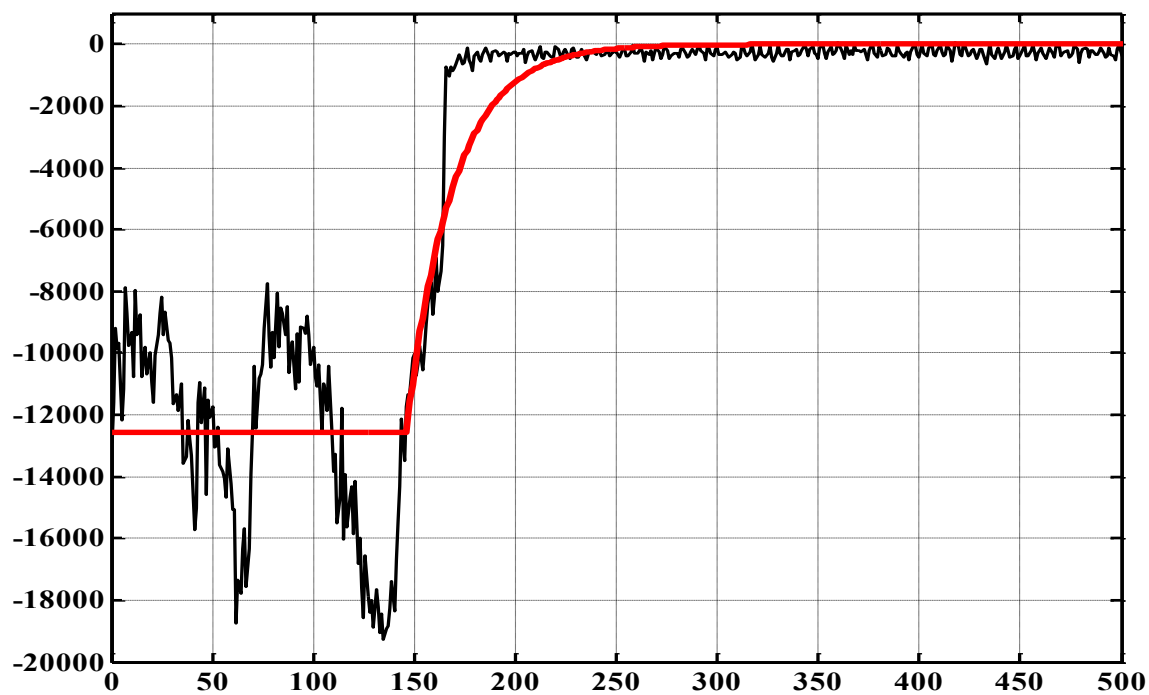


Рис. Д57 Экспериментальные и модельные результаты напряженности ЭСП, серия 7, опыт 3,
модель № 1

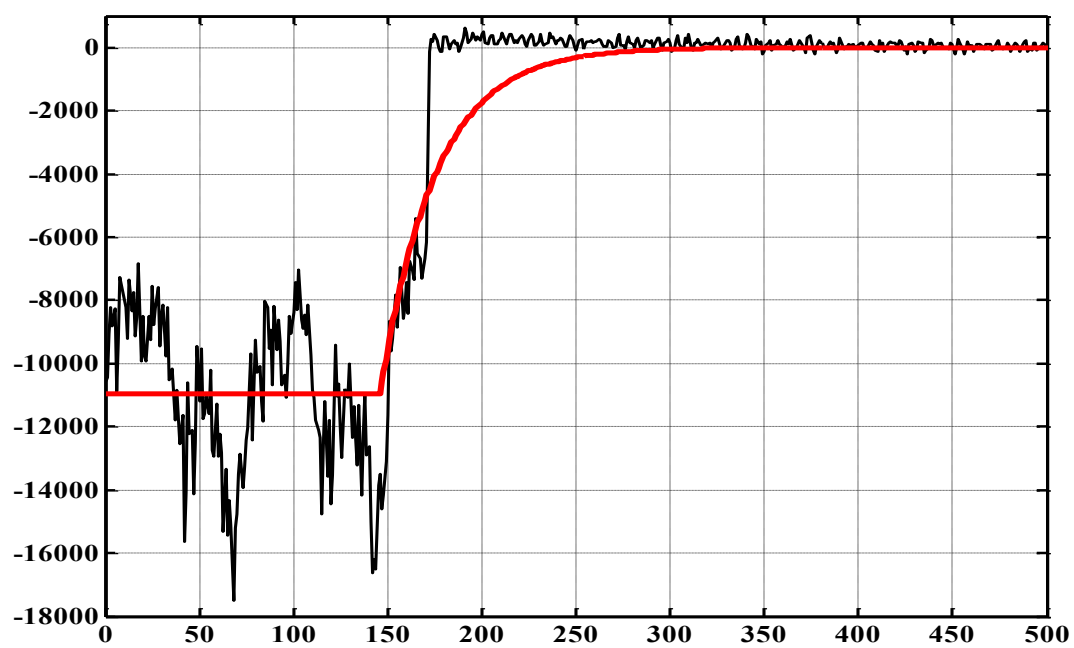


Рис. Д58 Экспериментальные и модельные результаты напряженности ЭСП, серия 7, опыт 3,
модель № 2

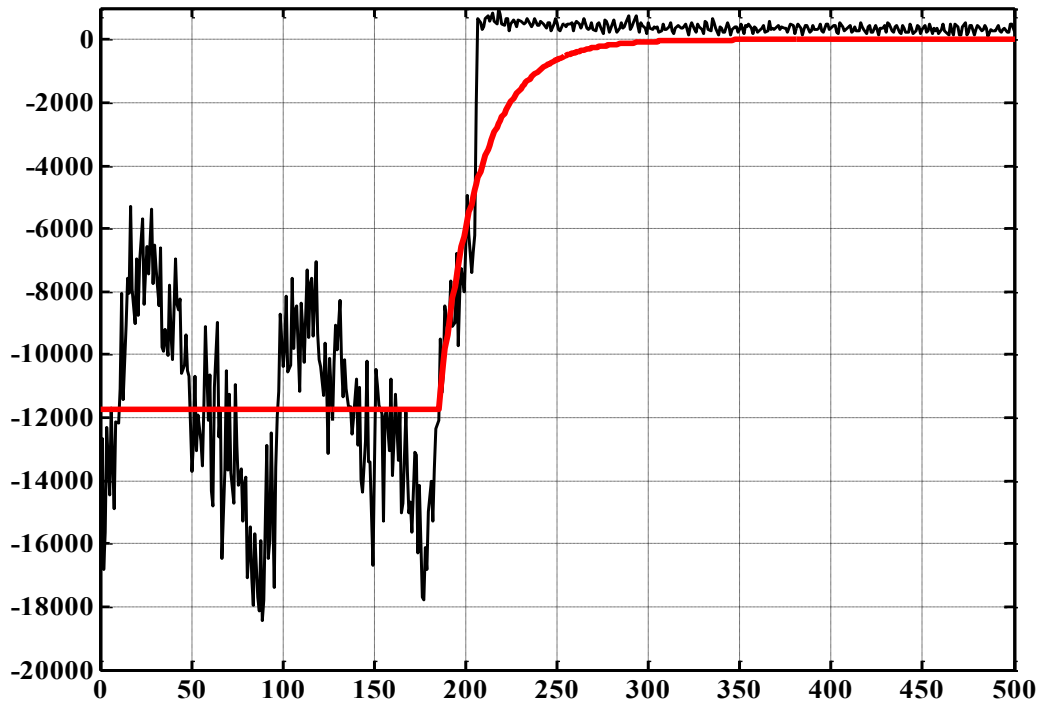


Рис. Д59 Экспериментальные и модельные результаты напряженности ЭСП, серия 7, опыт 3,
модель № 3

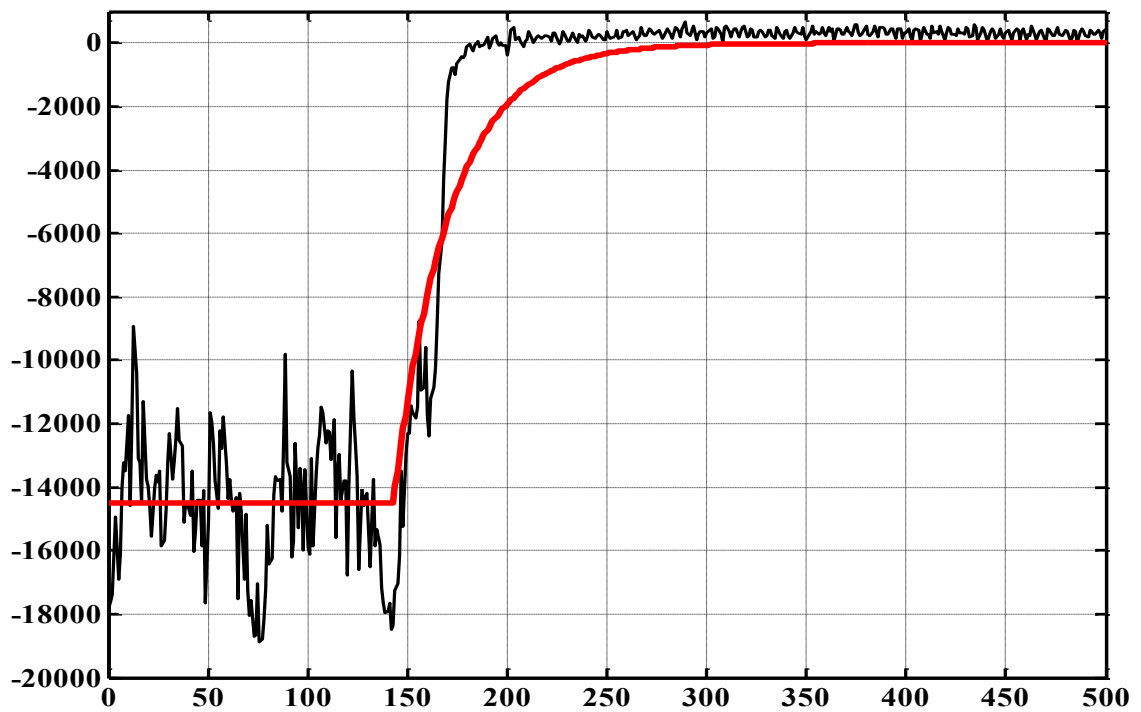


Рис. Д60 Экспериментальные и модельные результаты напряженности ЭСП, серия 7, опыт 4,
модель № 1

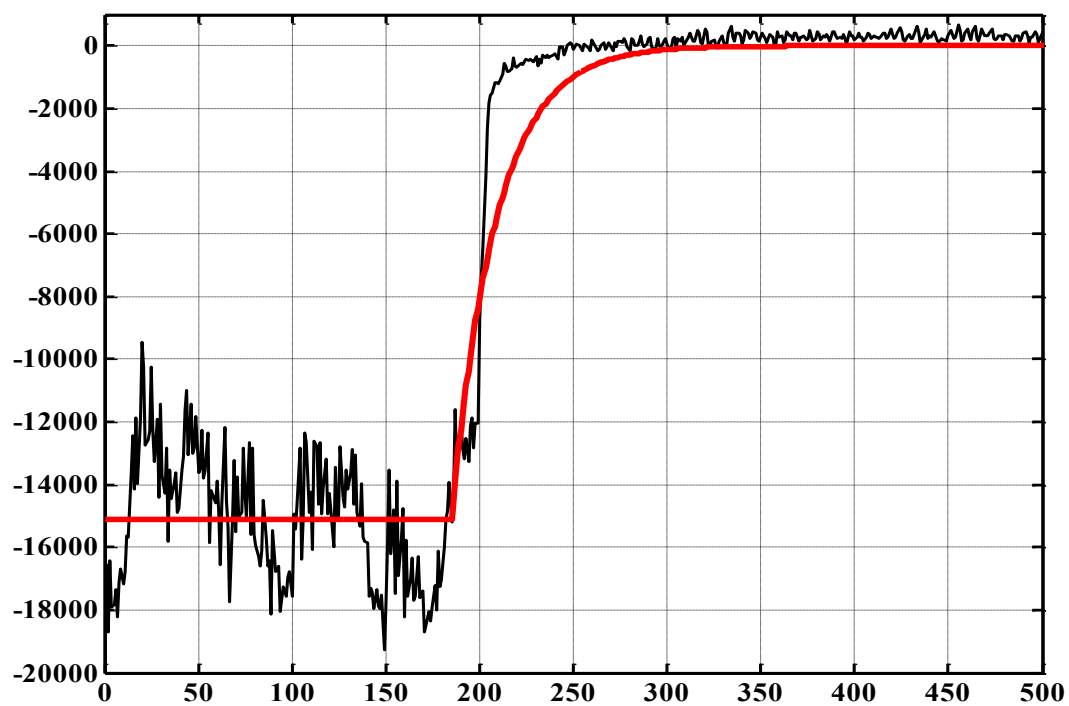


Рис. Д61 Экспериментальные и модельные результаты напряженности ЭСП, серия 7, опыт 4,
модель № 2

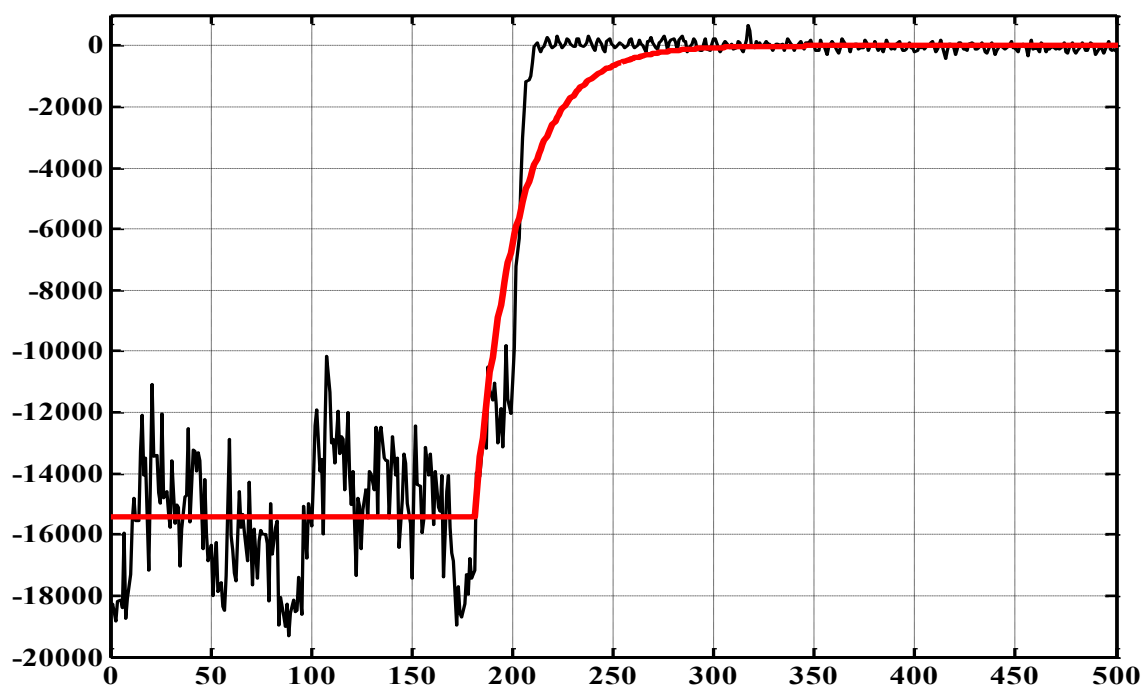


Рис. Д62 Экспериментальные и модельные результаты напряженности ЭСП, серия 7, опыт 4,
модель № 3

Приложение Е

**Показатели регрессионных моделей по результатам экспериментов
измерения напряженности ЭСП в системе
«обувь - человек - окружающая среда»**

Табл. Е1 Основные показатели (*) регрессионных моделей по результатам семи серий экспериментов

№ серии испыта ний	Опыт	Повторные опыты											
		Модель № 1				Модель № 2				Модель № 3			
		Ts	Usr	TauSr	R2	Ts	Usr	TauSr	R2	Ts	Usr	TauSr	R2
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1	1	2016.5 0	205	0.0396	0.665	942.7 4	246	0.0463	0.576 7	- 631.0 5	476	0.0051	0.045 6
	2	4108.1	202	0.0422	0.837	3457. 0	202	0.0411	0.741	3452. 0	216	0.0429	0.754 3
	3	1578.2	211	0.0069	0.847	- 912.4	222	0.0085	0.583	- 635.4 9	37	0.0247	- 0.191 4
2	1	14833	228	0.0339	0.962	1517 1	226	0.0307	0.963 1	14600	226	0.0271	0.937
	2	7018.4	180	0.0187	0.941	6671. 9	196	0.0323	0.947 5	6672. 0	195	0.326	0.947 6
	3	- 9898.5	204	0.0390	0.900	- 8341. 6	208	0.0436	0.886	- 8299. 3	151	0.0199	0.893
3	1	-17983	227	0.0394	0.987	- 1753 7	232	0.0432	0.981	- 17775	235	0.0427	0.981
	2	-13747	193	0.0439	0.937	- 1404 5	206	0.0398	0.935	- 16107	220	0.0381	0.966
	3	-10533	223	0.0473	0.954	- 1216 9	232	0.0402	0.950	- 11180	235	0.0366	0.945
4	1	- 5970.1	227	0.0390	0.838	- 5924. 3	245	0.0372	0.955	- 8633. 3	252	0.0389	0.939
	2	- 2719.4	239	0.0402	0.814	- 3564. 6	224	0.0152	0.911	- 3637. 5	219	0.0212	0.845
	3	-10073	255	0.0390	0.899	- 8557. 4	245	0.0453	0.937	- 9911. 7	231	0.0443	0.931
5	1	-13420	234	0.0415	0.955	- 1616 1	232	0.0475	0.969	- 16799	252	0.0389	0.971
	2	+1864 9	240	0.0425	0.959	+735 2.6	240	0.0441	0.934	+9911 .9	252	0.0387	0.911
	3	- 6962.2	244	0.0375	0.891	- 6841. 7	230	0.0385	0.899	- 9069. 7	225	0.0399	0.906
	4	-14992	221	0.0392	0.935	- 1349 3	238	0.0420	0.924	- 13965	228	0.0408	0.936
6	1	-19139	233	0.0409	0.982	- 1935 3	319	0.0298	0.983	- 19727	224	0.0396	0.978
	2	+3895. 9	241	0.0432	0.838	+182 11	262	0.0373	0.952	+1271 3	307	0.0342	0.904
	3	-12006	204	0.0421	0.933	- 1181 2	222	0.0414	0.932	- 12970	224	0.0382	0.946
	4	-15845	233	0.0387	0.943	- 1409 0	226	0.0395	0.945	- 14676	236	0.0397	0.933

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
7	1	$\frac{-}{3162.0}$	135	0.0392	0.915	$\frac{-}{3623.5}$	157	0.0389	0.932	$\frac{-}{5387.9}$	141	0.0414	0.956
	2	$\frac{+5526.}{1}$	111	0.0376	0.878	$\frac{+690}{4.5}$	137	0.0302	0.875	$\frac{+1646}{7}$	189	0.0440	0.946
	3	-12582	146	0.0432	0.915	$\frac{-}{1094.7}$	146	0.0341	0.927	$\frac{-}{11730}$	185	0.0440	0.913
	4	-14235	143	0.0422	0.959	$\frac{-}{1510.6}$	185	0.0419	0.967	$\frac{-}{15439}$	181	0.0459	0.969

*)

Ts – среднее значение напряженности ЭСП первого этапа эксперимента;

Usr – минимальное значение напряженности ЭСП второго этапа эксперимента;

TauSr - время стекания заряда

R2 - коэффициент детерминации

Приложение Ж
Акты внедрения

«УТВЕРЖДАЮ»

Генеральный директор

ЗАО МОФ «Парижская коммуна»

А.А. Никитин

25 декабря 2024 г.



АКТ

Мы, нижеподписавшиеся представители ФГБОУ ВО «РГУ им. А.Н. Косыгина» и ЗАО «МОФ «Парижская коммуна», составили настоящий акт о том, что результаты исследования, проведенные доцентом Белицкой О.А. в рамках диссертационной работы «Научно-практические основы разработки специальной антистатической обуви и методов оценки ее свойств» переданы ЗАО МОФ «Парижская Коммуна» в форме экспертной оценки рынка специальной обуви. Полученные ФГБОУ ВО «РГУ им. А.Н. Косыгина» решения демонстрируют картину распределения критериев и мотивов закупок специальной обуви предприятиями различных сфер промышленности, что позволяет усмотреть направления совершенствования конструкций специальных изделий и составить основу перспективной политики предприятия в области развития структуры ассортимента выпускаемых изделий.

Представители ФГБОУ ВО «РГУ
им. А.Н. Косыгина»

канд. техн. О.А. Белицкая
наук, доцент

д-р техн. наук, В.В. Костылева
профессор

Представители ЗАО «МОФ
«Парижская Коммуна»

Зам. генерального
директора по
управлению
производственным
комплексом, д-р
техн. наук., доцент

И.Р. Татарчук

АО «Егорьевск-обувь»
ИНН 5011017647 / КПП 501101001
Россия, 140305 Московская область,
г. Егорьевск, ул. Владимирская д.8

Телефон: +7 496 40 4-05-32
Факс: +7 496 40 4-05-34
Сайт: www.kotofey.ru
E-mail: info@kotofey.ru



«УТВЕРЖДАЮ»
Генеральный директор
АО «Егорьевск-обувь»
Сорокин С.В.
16 декабря 2024 г.

АКТ

производственной апробации результатов исследований

Мы, нижеподписавшиеся представители ФГБОУ ВО «РГУ им. А.Н. Косыгина» и АО «Егорьевск-обувь», составили настоящий акт о том, что результаты диссертационной работы Белицкой О.А. на тему «Научно-практические основы разработки специальной антистатической обуви и методов оценки ее свойств» внедрены на предприятии для оценки качества материалов обуви по требованиям биологической и механической безопасности, установленным в ТР ТС 007/2011 «О безопасности продукции, предназначенной для детей и подростков». Разработанные Белицкой О.А. динамический метод и методика экспериментального исследования трибоэлектрических свойств обувных материалов, позволяют измерять напряженность электростатического поля деталей обуви и обувных конструкций, которая не должна превышать 15 кВ/м.

На основе проведенных исследований разработаны мероприятия по улучшению конструкции обуви, включая рационализацию подбора используемых материалов и технологий их обработки. Внедрение динамического метода и методики экспериментального исследования трибоэлектрических свойств обувных материалов позволит компании АО «Егорьевск-обувь» эффективно контролировать и корректировать характеристики обуви, обеспечивая соответствие современным стандартам безопасности.

Представители
ФГБОУ ВО «РГУ им. А.Н. Косыгина»

Представители
АО «Егорьевск-обувь»

канд. техн. наук, доцент
О. А. Белицкая

д-р техн. наук, профессор
В. В. Костылева

Главный технолог
АО «Егорьевск-обувь» Левшина Е.Д.

р /с 40702.8102.40120100100 БИК 044525225 к/с 30101.8104.00000000225
Среднерусского банка ПАО «Сбербанк России»

«УТВЕРЖДАЮ»

Генеральный директор
ООО «НТМ-Защита»

Мурашов А.И.

20 23 г.

АКТ

производственной апробации результатов исследований

Мы, нижеподписавшиеся представители ФГБОУ ВО «РГУ им. А.Н. Косыгина» и ООО «НТМ-Защита», составили настоящий акт о том, что результаты диссертационной работы Белицкой О.А. на тему «Научно-практические основы разработки специальной антистатической обуви и методов оценки ее свойств» внедрены в производственный процесс компании.

Наименование объектов внедрения – «Метод исследования трибоэлектрических свойств обувных материалов», позволяющий исследовать динамику накопления и релаксации поверхностной плотности электростатического заряда при взаимодействии разнородных материалов на основе универсального измерителя напряженности и потенциала электростатического поля СТ-01, который производит ООО «НТМ-Защита».

Полученные ФГБОУ ВО «РГУ им. А.Н. Косыгина» в ходе апробации метода оценки трибоэлектрических свойств материалов данные послужили основой для разработки ООО «НТМ-Защита» модернизированного измерителя параметров электростатического поля СТ-07 с расширенными функциональными возможностями для измерений электростатического потенциала и плотности электрических зарядов поверхности. Измеритель СТ-07 включен в Реестр средств измерений РФ.

Представители ООО «НТМ-Защита»:

Генеральный директор
ООО «НТМ-Защита»

А.И. Мурашов

Технический директор
ООО «НТМ-Защита»,
канд. физ.-мат. наук

А.А. Котляров

Представители ФГБОУ ВО
«РГУ им. А.Н. Косыгина»:

канд. техн. наук, доцент

О.А. Белицкая

д-р техн. наук, профессор

В.В. Костылева

«УТВЕРЖДАЮ»

Генеральный директор
ООО «НТМ-Защита»

Мурашов А.И.

22 февраля 2024 г.

АКТ

"НТМ-
Защита"

производственной апробации результатов исследований

Мы, нижеподписавшиеся представители ФГБОУ ВО «РГУ им. А.Н. Косыгина» и ООО «НТМ-Защита», составили настоящий акт о том, что результаты диссертационной работы Белицкой О.А. на тему «Научно-практические основы разработки специальной антистатической обуви и методов оценки ее свойств» внедрены в производственный процесс ООО «НТМ-Защита».

Наименование объектов внедрения – «Метод оценки антистатических показателей в системе «обувь-человек-окружающая среда», который разработан с целью комплексной оценки антистатических характеристик специальной обуви в условиях реального эксплуатации, что обеспечивает высокую степень надежности получаемых данных. В качестве ключевого инструмента для реализации метода выступает индикатор-регистратор ИРИ-04М, который производится ООО «НТМ-Защита».

Полученные ФГБОУ ВО «РГУ им. А.Н. Косыгина» результаты испытаний при апробации метода оценки антистатических показателей позволили внести корректировки в проектирование и производство оборудования, отвечающие требованиям современных стандартов в области антистатической защиты.

Представители ООО «НТМ-Защита»:

Генеральный директор
ООО «НТМ-Защита»

А.И. Мурашов

Технический директор
ООО «НТМ-Защита»,
канд. физ.-мат. наук

А.А. Котляров

Представители ФГБОУ ВО
«РГУ им. А.Н. Косыгина»:

канд. техн. наук, доцент

О.А. Белицкая

д-р техн. наук, профессор

В.В. Костылева

«УТВЕРЖДАЮ»

директор

ООО ТД «ЯХТИНГ»

Шатилов А. И.

6.02. 2025 г.

АКТ

производственной апробации результатов исследований



Настоящий акт составлен представителями ООО ТД «ЯХТИНГ» и ФГБОУ ВО «РГУ им. А.Н. Косыгина» о том, что результаты диссертационной работы Белицкой О.А. на тему «Научно-практические основы разработки специальной антистатической обуви и методов оценки ее свойств» были использованы при разработке и проектировании новых моделей специальной обуви.

Предложенная Белицкой О.А. концепция научно-обоснованной антистатической конструкции специальной обуви с заземляющими свойствами для производственных рабочих и инженерно-технических работников предполагает, что накопленный в процессе передвижения заряд с тела человека передается на плату со сменным резистором постоянного электрического сопротивления $R_{\text{п}}$ и далее стекает на напольное покрытие или землю. Электрическое сопротивление задается в диапазоне от $1 \cdot 10^5$ Ом до $1 \cdot 10^9$ Ом, что обеспечивает нормированную проводимость для стекания заряда.

Разработанная ФГБОУ ВО «РГУ им. А.Н. Косыгина» конструкция антистатической обуви, способствующая предотвращению аварий, которые происходят в нефтегазоперерабатывающей отрасли вследствие образования статического электричества на теле человека, исключить или свести к минимуму вероятность выхода из строя чувствительных электронных систем и компонентов представляет для ООО ТД «ЯХТИНГ» интерес и позволяет усмотреть направления перспективной политики предприятия в области развития структуры ассортимента выпускаемых изделий.

Представители ООО ТД
«ЯХТИНГ»

Смирнов Н.В.

Заместитель генерального
директора по коммерческим
вопросам

Шатилов М.А.

Заместитель генерального
директора по производству

Представители ФГБОУ ВО
«РГУ им. А.Н. Косыгина»:

канд. техн. наук, доцент

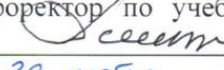
О.А. Белицкая

д-р техн. наук, профессор

В.В. Костылева

«УТВЕРЖДАЮ»

Проректор по учебно-методической работе

 С.Г. Дембицкий

20 ноября

2017 г.



АКТ

внедрения в учебный процесс результатов
диссертационной работы

Белицкой Ольги Александровны

«Научно-практические основы разработки специальной антистатической
обуви и методов оценки ее свойств»

Мы, нижеподписавшиеся, Костылева В.В., Киселев С.Ю., Литвин Е.В. составили настоящий акт о том, что результаты теоретических исследований, полученные в диссертации Белицкой О.А. содержатся в монографии «Основы моделирования трибоэлектрических свойств материалов для обуви» (авторы: Белицкая О.А., Леденева И.Н., Москва, ФГБОУ ВПО «МГУДТ», 2014), предназначенная для преподавателей и студентов, научных работников, практиков и широкого круга читателей.

Заведующий кафедрой
художественного моделирования,
конструирования и
технологии изделий из кожи,
д.т.н., профессор



В.В. Костылева

Д.т.н., профессор кафедры
художественного моделирования,
конструирования и
технологии изделий из кожи



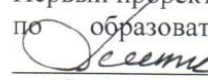
С.Ю. Киселев

К.т.н., доцент кафедры
художественного моделирования,
конструирования и
технологии изделий из кожи



Е.В. Литвин

«УТВЕРЖДАЮ»

Первый проректор - проректор
по образовательной деятельности С.И. Дембицкий

19 сентября 2022 г.



АКТ

внедрения в учебный процесс результатов
диссертационной работы

Белицкой Ольги Александровны

«Научно-практические основы разработки специальной антистатической
обуви и методов оценки ее свойств»

Мы, нижеподписавшиеся, Костылева В.В., Киселев С.Ю., Литвин Е.В. составили настоящий акт о том, что результаты теоретических исследований, полученные в диссертации Белицкой О.А. содержатся в монографии «Антистатическая обувь: состояние производства и его перспективы» (автор: Белицкая О.А., Москва, ФГБОУ ВО «РГУ им. А.Н. Косыгина», 2022), предназначенная для преподавателей и студентов, научных работников, практиков и широкого круга читателей.

Заведующий кафедрой
художественного моделирования,
конструирования и
технологии изделий из кожи,
д.т.н., профессор

 В.В. Костылева

Д.т.н., профессор кафедры
художественного моделирования,
конструирования и
технологии изделий из кожи

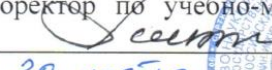
 С.Ю. Киселев

К.т.н., доцент кафедры
художественного моделирования,
конструирования и
технологии изделий из кожи

 Е.В. Литвин

«УТВЕРЖДАЮ»

Проректор по учебно-методической работе

 С.Г. Дембицкий

20 ноября

2017 г.



АКТ

внедрения в учебный процесс результатов
диссертационной работы
Белицкой Ольги Александровны
«Научно-практические основы разработки специальной антистатической
обуви и методов оценки ее свойств»

Мы, нижеподписавшиеся, Костылева В. В., Киселев С. Ю., Литвин Е.В. составили настоящий акт о том, что результаты теоретических исследований, полученные в диссертации Белицкой О.А. содержатся в монографии «Проектирование технологических процессов производства обуви с применением информационных технологий» в виде отдельных разделов: развитие методик проектирования технологических процессов, системы автоматизированного проектирования – путь инновационного развития методики технологической подготовки производства, ключевые проблемы и перспективы развития САПР, предназначенная для преподавателей, аспирантов, магистров и студентов, исследующих проблему разработки и внедрения САПР производств изделий легкой промышленности (авторы: Леденева И.Н., Леденев М.О., Разин И.Б., Литвин Е.В., Белицкая О.А., Москва, ФГБОУ ВПО «МГУДТ», 2015).

Заведующий кафедрой
художественного моделирования,
конструирования и
технологии изделий из кожи,
д.т.н., профессор

В.В. Костылева

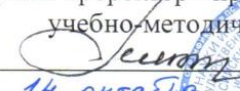
Д.т.н., профессор кафедры
художественного моделирования,
конструирования и
технологии изделий из кожи

С.Ю. Киселев

К.т.н., доцент кафедры
художественного моделирования,
конструирования и
технологии изделий из кожи

Е.В. Литвин

«УТВЕРЖДАЮ»

Первый проректор - проректор
по учебно-методической работе С.Г. Дембинский
14 октября 2020 г.

АКТ

внедрения в учебный процесс результатов диссертационной работы
Белицкой Ольги Александровны
«Научно-практические основы разработки специальной антистатической
обуви и методов оценки ее свойств»

Мы, нижеподписавшиеся, Костылева В. В., Фокина А.А., Литвин Е.В. составили настоящий акт о том, что результаты теоретических исследований, полученные в диссертации Белицкой О.А. содержатся в учебном пособии «Современные представления о материалах, конструкциях и технологиях изготовления специальной обуви различного назначения», предназначенное для обучающихся по направлениям 29.03.01/29.04.01 Технология изделий легкой промышленности, 29.03.05/29.04.05 Конструирование изделий легкой промышленности, 38.03.07/38.04.07 Товароведение всех форм обучения (авторы: Белицкая О.А., Сироткина О.В., Москва, ФГБОУ ВО «РГУ им. А.Н. Косыгина», 2020).

Заведующий кафедрой
художественного моделирования,
конструирования и
технологии изделий из кожи,
д.т.н., профессор

В.В. Костылева

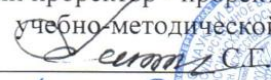
Директор Технологического
института легкой промышленности,
к.т.н., доцент

А.А. Фокина

К.т.н., доцент кафедры
художественного моделирования,
конструирования и
технологии изделий из кожи

Е.В. Литвин

«УТВЕРЖДАЮ»

Первый проректор - проректор
по учебно-методической работе
С.Г. Дембицкий
4 октября 2021 г.

АКТ

внедрения в учебный процесс результатов диссертационной работы
Белицкой Ольги Александровны
«Научно-практические основы разработки специальной антистатической
обуви и методов оценки ее свойств»

Мы, нижеподписавшиеся, Костылева В.В., Фокина А.А., Литвин Е.В. составили настоящий акт о том, что результаты теоретических исследований, полученные в диссертации Белицкой О.А. содержатся в учебном пособии «Совершенствование технологии разработки пресс-форм для производства изделий из кожи», предназначенное для обучающихся по направлениям 29.03.01/29.04.01 Технология изделий легкой промышленности, 29.03.05/29.04.05 Конструирование изделий легкой промышленности всех форм обучения, слушателей Института дополнительного образования (авторы: Минец В.В., Белицкая О.А., Москва, ФГБОУ ВО «РГУ им. А.Н. Косыгина», 2021).

Заведующий кафедрой
художественного моделирования,
конструирования и
технологии изделий из кожи,
д.т.н., профессор


В.В. Костылева

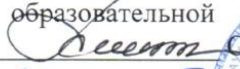
Директор Технологического
института легкой промышленности,
к.т.н., доцент


А.А. Фокина

К.т.н., доцент кафедры
художественного моделирования,
конструирования и
технологии изделий из кожи


Е.В. Литвин

«УТВЕРЖДАЮ»

Первый проректор - проректор
по образовательной деятельности С.Г. Дембицкий
23 сентября 2024 г.

АКТ

внедрения в учебный процесс результатов диссертационной работы
Белицкой Ольги Александровны
«Научно-практические основы разработки специальной антистатической
обуви и методов оценки ее свойств»

Мы, нижеподписавшиеся, Костылева В.В., Фокина А.А., Литвин Е.В. составили настоящий акт о том, что результаты теоретических исследований, полученные в диссертации Белицкой О.А. содержатся в учебном пособии «Независимый цикл получения изделий с помощью 3D-печати», предназначенное для обучающихся по направлениям 29.03.01/29.04.01 Технология изделий легкой промышленности, 29.03.05/29.04.05 Конструирование изделий легкой промышленности всех форм обучения (авторы: Белицкая О.А., Москва, ФГБОУ ВО «РГУ им. А.Н. Косыгина», 2024).

Заведующий кафедрой
художественного моделирования,
конструирования и
технологии изделий из кожи,
д.т.н., профессор

 В.В. Костылева

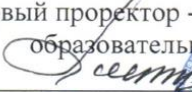
Директор Технологического
института легкой промышленности,
к.т.н., доцент

 А.А. Фокина

К.т.н., доцент кафедры
художественного моделирования,
конструирования и
технологии изделий из кожи

 Е.В. Литвин

«УТВЕРЖДАЮ»

Первый проректор - проректор
по образовательной деятельности С.Г. Дембицкий
23 сентября 2024 г.**АКТ**

внедрения в учебный процесс результатов диссертационной работы
Белицкой Ольги Александровны
«Научно-практические основы разработки специальной антистатической
обуви и методов оценки ее свойств»

Мы, нижеподписавшиеся, Костылева В.В., Фокина А.А., Литвин Е.В. составили настоящий акт о том, что результаты теоретических исследований, полученные в диссертации Белицкой О.А. содержатся в учебном пособии «Международные системы качества и безопасности товаров», предназначенное для обучающихся по направлениям 29.03.01/29.04.01 Технология изделий легкой промышленности, 29.03.05/29.04.05 Конструирование изделий легкой промышленности всех форм обучения (авторы: Белицкая О.А., Москва, ФГБОУ ВО «РГУ им. А.Н. Косыгина», 2024).

Заведующий кафедрой
художественного моделирования,
конструирования и
технологии изделий из кожи,
д.т.н., профессор



В.В. Костылева

Директор Технологического
института легкой промышленности,
к.т.н., доцент



А.А. Фокина

К.т.н., доцент кафедры
художественного моделирования,
конструирования и
технологии изделий из кожи



Е.В. Литвин

«УТВЕРЖДАЮ»

Проректор по учебно-методической работе

15 апреля

Дембицкий

2019 г.



АКТ

внедрения в учебный процесс результатов диссертационной работы
Белицкой Ольги Александровны
«Научно-практические основы разработки специальной антистатической
обуви и методов оценки ее свойств»

Мы, нижеподписавшиеся, Костылева В.В., Фокина А.А., Литвин Е.В. составили настоящий акт о том, что результаты теоретических исследований, полученные в диссертации Белицкой О.А. содержатся в учебном пособии «Теоретические основы управления качеством изделий легкой промышленности», предназначенное для обучающихся по направлениям подготовки магистратуры 29.04.01 Технология изделий легкой промышленности, 29.04.05 Конструирование изделий легкой промышленности и аспирантуры 29.06.01 Технологии легкой промышленности (авторы: Конарева Ю.С., Белицкая О.А., Москва, ФГБОУ ВО «РГУ им. А.Н. Косыгина», 2018).

Заведующий кафедрой
художественного моделирования,
конструирования и
технологии изделий из кожи,
д.т.н., профессор

В.В. Костылева

Директор Технологического
института легкой промышленности,
к.т.н., доцент

А.А. Фокина

К.т.н., доцент кафедры
художественного моделирования,
конструирования и
технологии изделий из кожи

Е.В. Литвин

Е.В. Литвин