

На правах рукописи



КОНЫШИНА Татьяна Александровна

**НАУЧНОЕ ОБОСНОВАНИЕ КОМПЛЕКСНОГО МЕТОДА
ГИГИЕНИЧЕСКОЙ ОЦЕНКИ СРЕДСТВ ИНДИВИДУАЛЬНОЙ
ЗАЩИТЫ ОТ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ ПРОМЫШЛЕННОЙ
ЧАСТОТЫ**

3.2.4. – Медицина труда

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата биологических наук

Москва – 2021

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном научном учреждении «Научно-исследовательский институт медицины труда имени академика Н.Ф. Измерова» Минобрнауки России.

Научный руководитель: **Перов Сергей Юрьевич**
доктор биологических наук

Официальные оппоненты: **Никитина Валентина Николаевна**
доктор медицинских наук, старший научный сотрудник / Федеральное бюджетное учреждение науки «Северо-западный научный центр гигиены и общественного здоровья» Роспотребнадзора, заведующая отделением изучения электромагнитных излучений

Чуян Елена Николаевна

доктор биологических наук, профессор / Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Крымский федеральный университет имени В.И. Вернадского», Институт биохимических технологий, экологии и фармации, заведующая кафедрой физиологии человека и животных и биофизики

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Государственный научный центр Российской Федерации – Институт медико-биологических проблем» Российской академии наук

Защита состоится «28» февраля 2021 г. в 11.00 часов на заседании диссертационного совета 24.1.176.01 (Д 001.012.01) при Федеральном государственном бюджетном научном учреждении «Научно-исследовательский институт медицины труда имени академика Н.Ф. Измерова» Минобрнауки России по адресу: 105275, г. Москва, проспект Буденного, 31.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБНУ «НИИ МТ» по адресу 105275, г. Москва, проспект Буденного, 31, а также на официальном сайте ФГБНУ «НИИ МТ» – <http://www.irioh.ru>.

Автореферат разослан «_» _____ 2021 года.

Ученый секретарь диссертационного совета
доктор биологических наук, профессор

Нина Борисовна Рубцова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Стратегия развития медицинской науки в Российской Федерации до 2025 г. в числе приоритетных направлений в рамках реализации научной платформы «Профилактическая среда» предусматривает разработку гармонизированных с международными требованиями гигиенических регламентов, критериев и методов оценки физических факторов производственной и окружающей среды.

Проблема сохранения здоровья работников при воздействии вредных и опасных факторов производственной среды представляет все бóльшую актуальность в связи с необходимостью сохранения трудовых ресурсов в отраслях экономики, играющих ведущую роль в национальной безопасности страны, таких как электроэнергетика и железнодорожный транспорт.

Электрические и магнитные поля (ЭП и МП) промышленной частоты 50 Гц (ПЧ) являются одним из наиболее распространенных физических факторов производственной среды. Персонал, осуществляющий работу вблизи элементов систем передачи и распределения электроэнергии (воздушные линии электропередачи (ВЛ) сверх- и ультравысокого напряжения, открытые распределительные устройства (ОРУ) и т.д.), на контактной сети железной дороги, подвергается воздействию высокоинтенсивных уровней ЭП и МП ПЧ, часто превышающих предельно допустимые (ПДУ).

Впервые данные о неблагоприятном влиянии ЭП ПЧ на здоровье работников, обслуживающих подстанции сверхвысокого класса напряжения, были получены в нашей стране (Асанова Т.П. и соавт., 1963, 1966; Данилин В.А. и соавт., 1969; Коробкова В.П. и соавт., 1972; Абрамович-Поляков Л.Н., 1973; Думанский Ю.Д. и соавт., 1977). Они послужили началом систематического изучения состояния здоровья персонала, подвергающегося производственным воздействиям ЭП и МП ПЧ за рубежом (Barnes H.C. et al., 1967; Kouwenhoven W.B. et al., 1967; Fole F.F. et al., 1972, 1974; Singewald M.L. et al., 1973; Wertheimer N. et al., 1979; Jingyi E. et al., 1980; Milham S., 1982, 1985; Nordstrom S. et al., 1983; Receny J. et al., 1983). Международное агентство по исследованию рака в 2002 г. отнесло МП частотного диапазона 30-300 Гц к потенциальным канцерогенам (категория «2b») по лейкозам для детей (IARC, 2002).

Результаты исследований, выполненных более, чем за шестидесятилетний период, свидетельствуют о том, что систематическое воздействие ЭП и МП ПЧ с уровнями, превышающими ПДУ, является одним из факторов риска в развитии раннего атеросклероза, гипертонической болезни, ишемической болезни сердца и инфарктов миокарда, депрессии, онкологических заболеваний, а также таких нейродегенеративных заболеваний, как болезни Альцгеймера и Паркинсона, прогрессирующая мышечная атрофия, боковой амиотрофический склероз (Рубцова Н.Б. и соавт., 2004, 2012; Фатхутдинова Л.М. и соавт., 2005, 2017; Пальцев Ю.П. и соавт., 2010; Hosseinabadi et al., 2019; Яшникова М.В. и соавт., 2019; Тихонова Г.И. и соавт., 2020).

Для защиты от неблагоприятного влияния ЭП ПЧ на здоровье человека наиболее функциональным и оптимальным является применение средств индивидуальной защиты (СИЗ) (Göcsei G. et al., 2015; Pirkkalainen et al., 2016; Н. Рубцова Н.Б. и соавт., 2018).

Степень разработанности темы исследования. При проведении работ на высоте и на потенциале провода вблизи токоведущих частей ВЛ отсутствует возможность адекватной гигиенической оценки ЭП и МП ПЧ из-за ограничений проведения таких измерений современными средствами метрологического контроля. Решение данной проблемы возможно путем применения методов математического моделирования, которое требует валидации посредством инструментальной гигиенической оценки.

В то же время сложность в оценке защитных характеристик СИЗ в соответствии с существующими нормативными документами заключается в сопоставлении непрямого критерия эффективности СИЗ и гигиенических регламентов производственных воздействий ЭП ПЧ, а также в практической реализации методов лабораторных испытаний. Недостаток адекватных исследований биологической эффективности экранирования ЭП ПЧ указывает на необходимость изучения оценки степени ослабления ЭП ПЧ экранирующими материалами, имитирующими СИЗ, с целью подтверждения отсутствия выраженных биологических эффектов, зависящих от плотности наведенного электрического тока.

На теплообмен человека помимо параметров микроклимата и уровня энерготрат, обусловленных физической активностью, большое влияние оказывает

применение СИЗ. Теплофизические параметры материалов СИЗ, их конструкция и масса могут существенно ухудшать тепловое состояние человека (Афанасьева Р.Ф. и соавт., 2012; Pancardo P. et al., 2015; Zhang X.A. et al., 2014, 2019; Бурмистрова О.В. и соавт., 2019). В ФГБНУ «НИИ МТ» проводились исследования по оценке теплового состояния человека при эксплуатации СИЗ от ЭП ПЧ в нагревающей среде (Афанасьева Р.Ф. и соавт., 2000), однако в настоящее время этот вопрос является недостаточно изученным, что предполагает актуальность научной проработки материала.

В соответствии с вышеупомянутым, необходимо отметить, что одним из перспективных направлений деятельности в этой области представляется совершенствование методов оценки ЭП и МП ПЧ с привлечением современных численных методов, модернизация методов инструментальной оценки ЭП при исследовании эффективности СИЗ, в том числе с учетом критериев физиолого-гигиенической оценки.

Цель исследования – на основании комплексных физиолого-гигиенических, дозиметрических и экспериментальных исследований научно обосновать и разработать системные критерии гигиенической оценки средств индивидуальной защиты от электрического поля промышленной частоты, направленные на сохранение здоровья работников.

Задачи исследования:

1. Провести гигиеническую оценку уровней электрического и магнитного полей промышленной частоты на рабочих местах персонала электросетевых объектов напряжением 500 и 750 кВ.

2. Разработать математические модели условий экспозиции электрическим и магнитным полем промышленной частоты, соответствующих электромагнитной обстановке на рабочих местах персонала электросетевых объектов.

3. Научно обосновать, разработать и апробировать методику оценки эффективности средств индивидуальной защиты от воздействия электрического поля промышленной частоты в лабораторных условиях и на электросетевых объектах.

4. Разработать математические модели для экспериментального изучения влияния электрического поля промышленной частоты на животных в условиях экранирования.

5. Провести экспериментальное исследование по изучению отдельных биологических эффектов воздействия электрического поля промышленной частоты на животных в условиях моделирования применения экранирующих материалов.

6. Провести физиолого-гигиеническую оценку теплового состояния добровольцев при эксплуатации средств индивидуальной защиты от электрического поля промышленной частоты в условиях нагревающей среды.

Научная новизна исследования. Проведенные исследования позволили обосновать комплексный метод гигиенической оценки электрического и магнитного полей промышленной частоты для различных условий работы (в том числе при осуществлении работ под напряжением) с использованием инструментального подхода, прогнозирования наихудших условий на рабочих местах и математического моделирования.

Впервые экспериментальные исследования на животных с применением экранирующих материалов позволили оценить биологически эффективное снижение уровней электрического поля промышленной частоты, моделирующее эксплуатацию средств индивидуальной защиты электротехнического персонала.

Исследования на добровольцах в условиях нагревающей среды и на фантомах человека в условиях пребывания в электрическом поле промышленной частоты позволили впервые обосновать комплексный метод гигиенической оценки средств индивидуальной защиты и определить их необходимые комплектации с учетом сочетанного действия факторов.

Теоретическая и практическая значимость исследования. Полученные результаты дают возможность в дальнейшем с помощью разработанных математических моделей условий экспозиции на рабочих местах электротехнического персонала проводить прогностическую оценку производственных воздействий ЭП и МП ПЧ, учитывающую различные виды работ.

Материалы диссертационной работы использованы при разработке: ГОСТ ССБТ 12.4.172-2019 «Средства индивидуальной защиты от электрических полей

промышленной частоты. Комплекты индивидуальные экранирующие. Общие технические требования. Методы испытаний» (вступивший в действие с 1 сентября 2020 г.); ГОСТ ССБТ 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» (вступивший в действие с 1 сентября 2020 г.); аттестованной методики «Методика измерений напряженности электрического поля промышленной частоты для определения коэффициента экранирования индивидуальных экранирующих комплектов» (свидетельство об аттестации №265.0136/RA.RU.311866/2019).

Методология и методы исследования. В работе использовались следующие методы исследований, включающие измерения, математическое моделирование, натуральные и модельные экспериментальные исследования.

При проведении исследований использовались методы оценки эффективности СИЗ с помощью измерений напряженности ЭП ПЧ, оценки ориентировочно-исследовательской активности лабораторных животных модифицированным методом «открытого поля». Оценка теплового состояния добровольцев проводилась по интегральному показателю накопления тепла в организме. Анализ результатов включал методы статистической обработки данных с применением современного программного обеспечения.

Исследование одобрено Локальным комитетом по этике ФГБНУ «НИИ МТ» (протокол №8 от 17.10.2018 г.).

Основные положения, выносимые на защиту:

Разработанный, обоснованный и апробированный комплексный метод гигиенической оценки электрического и магнитного полей промышленной частоты на рабочих местах персонала и эффективности применения средств индивидуальной защиты (в т.ч. при выполнении работ у токоведущих частей, находящихся под напряжением) позволяет решать задачи сохранения здоровья электротехнического персонала.

Математическая модель экспериментального исследования по оценке наведенных токов в фантомах животных в условиях экранирования и результаты экспериментального исследования биологических эффектов электрических полей промышленной частоты у животных позволили оценить эффективность

применения экранирующих материалов, имитирующих средства индивидуальной защиты, что подтверждается данными лабораторных и полевых исследований эффективности средств индивидуальной защиты от электрического поля промышленной частоты, а исследования на добровольцах впервые обосновали необходимость учета влияния средств индивидуальной защиты на тепловое состояние человека в летний период года.

Степень достоверности и апробация результатов исследования.

Достоверность результатов проведенных исследований подтверждается их достаточным объемом, применением современных гигиенических, дозиметрических и экспериментальных методов, соответствующих поставленным цели и задачам.

Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на Международной научной конференции «Техногенные системы и экологический риск» (Обнинск, 2018 г., 2020 г.), VII Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых и специалистов «Инновационные подходы в решении медико-биологических проблем здоровья населения» (Москва, 2018 г.), конкурсе научно-исследовательских работ студентов и аспирантов в рамках Международной специализированной выставки «Безопасность и охрана труда» (Москва, 2018 г.), научно-практической конференции молодых ученых и специалистов с международным участием «Актуальные проблемы гигиены, токсикологии и профпатологии», посвященной 100-летию со дня рождения академика РАН А.П. Шицковой (Мытищи, 2019 г.), Международной научно-практической конференции «Здоровье и окружающая среда» (Минск, 2019 г., 2020 г.), 3-м Международном молодежном форуме «Профессия и здоровье» (Суздаль, 2020 г.), V Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых «Актуальные проблемы профилактической медицины и общественного здоровья» (Москва, 2021 г.), IV Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых «Экология и здоровье населения» (г. Ангарск, 2021 г.), заседании отдела по изучению гигиенических проблем в медицине труда ФГБНУ «НИИ МТ» (протокол № 8 от 23.06.2021 г.).

Личный вклад автора. Автор принимал непосредственное участие в формулировке цели и задач, постановке, планировании, обосновании

методологии и методов исследований, в создании математических моделей, проведении экспериментальных исследований, статистической обработке и анализе результатов, подготовке публикаций. Участие автора в разработке – 80%, проведении исследований – 90%, обработке и анализе результатов – 90%.

Публикации. Основные результаты диссертационной работы опубликованы в 22 научных работах, из которых 6 статей опубликовано в рецензируемых научных изданиях, включенных в перечень международных реферативных баз данных и систем цитирования ВАК при Министерстве науки и высшего образования РФ.

Структура и объем диссертационной работы. Диссертационная работа состоит из введения, трех глав, заключения, выводов, списка литературы и 7 приложений. Работа изложена на 151 с., содержит 29 рисунков и 12 таблиц. Список литературы содержит 159 источников, из них 71 отечественных и 88 зарубежных.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы, определены цель и задачи исследования, раскрыта научная новизна и практическая значимость, сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

В **первой главе** представлен обзор отечественных и зарубежных работ, посвященных теме диссертации. Анализируются механизмы биологического действия ЭП и МП ПЧ, их влияние на организм человека и экспериментальных животных, основные аспекты обеспечения сохранения здоровья электротехнического персонала, контроля уровней напряженности ЭП и МП ПЧ, принципов защиты работников. Сделан вывод о недостаточной проработанности задач гигиенической оценки ЭП и МП ПЧ на рабочих местах и определения эффективности защиты от ЭП ПЧ.

Во **второй главе** представлена постановка, объем и методы исследований (рис.1). Гигиеническая оценка ЭП и МП ПЧ проводилась на наземных рабочих местах персонала ОРУ подстанций и в зонах прохождения ВЛ напряжением 500 и 750 кВ. Измерения ЭП и МП ПЧ проводились с помощью измерителя напряженности поля промышленной частоты ПЗ-50 (ЗАО «ТАНО», Россия) и измерителя электрических и магнитных полей EFA-300 (Narda Safety Test

Solutions GmbH, Германия), на ОРУ было проведено 4560 измерений в 760 точках и в зонах прохождения ВЛ – 2592 измерения в 432 точках.



Рисунок 1 – Схема исследований

Моделирование условий экспозиции ЭП и МП ПЧ ВЛ напряжением 500 и 750 кВ, а также экспериментального исследования на животных выполнялось в среде трехмерного моделирования SEMCAD X v.14.8.6 (SPEAG AG, Швейцария), расчет математических моделей осуществлялся методом конечных разностей в частотной области. В разработке математических моделей использовались гетерогенные фантомы крыс Sprague Dawley (IT'IS Foundation, Швейцария).

Исследования эффективности экранирования СИЗ выполнялись в лаборатории электромагнитных полей ФГБНУ «НИИ МТ» на высоковольтном испытательном стенде переменного тока промышленной частоты и на электросетевом объекте (ОРУ 750 кВ) с использованием диэлектрического манекена с антропометрическими характеристиками взрослого человека. Исследования проводились при имитации работ на потенциале земли и

потенциале провода. В лабораторных условиях было проведено 90 измерений на потенциале земли и 180 измерений на потенциале провода, на ОРУ 750 кВ – 15 измерений.

Экспериментальное изучение биологического действия ЭП ПЧ с применением экранирующих материалов проводилось на лабораторных беспородных крысах (36 особей – самцы массой 200 ± 10 г). Оценка состояния центральной нервной системы осуществлялось по параметрам ориентировочно-исследовательской активности модифицированным методом «открытого поля» с расчетом интегрального показателя «энтропия» после 1, 3 и 5 дней воздействия при применении аппаратно-программного комплекса Open Field test (OpenScience, Russia) и программного обеспечения Норка 2.0 (Свидетельство о регистрации ПО для ЭВМ № 2016619940).

Оценка лейкоцитарной формулы крови осуществлялась путем подсчета лейкоцитов в окрашенных по Романовскому-Гимзе мазках по методу Шиллинга, концентрацию показателей перекисного окисления липидов (ПОЛ) – диеновых конъюгатов и кетодиенов оценивали методом З.Я. Плацера (Placer Z. et al., 1970) после 5 дней экспозиции. Выделение липидов из плазмы крови проводили по методу М.А. Креховой и М.К. Чехрановой (Крехова М.А. и соавт., 1971). Подсчет лейкоцитов осуществлялся с использованием микроскопа Levenhuk MED 10 (Levenhuk, Inc., США), концентрация показателей ПОЛ – с использованием спектрофотометра Cary-50 (Varian, США) и стандартных методик.

Физиолого-гигиеническое исследование теплового состояния организма человека при применении СИЗ было выполнено при участии трех добровольцев с различными типами конституции и физической подготовки в соответствии с МУК 4.3.1895-04. Продолжительность исследования составляла 70 минут, из которых 40 минут добровольцы выполняли регламентированную физическую работу (температура воздуха $34,8 \pm 0,3^\circ\text{C}$, его относительная влажность $48,0 \pm 3,0\%$, скорость движения $0,15 \pm 0,02$ м/с) и 30 минут находились в покое при комфортном микроклимате.

Исследования проводились в микроклиматической камере с использованием прибора контроля параметров воздушной среды Метеометр МЭС-200А (ЗАО «НПП Электронстандарт», Россия), измерителя плотности теплового потока и температуры в модификации ИТП-МГ4.03/30(II) «ПОТОК»

(ООО «СКБ Стройприбор», Россия), термометра медицинского электронного инфракрасного (B.Well, Швейцария), пульсоксиметра напалечного серии MD 300C (Beijing Choice Electronic Technology Co., Ltd., Китай).

Статистическая обработка данных осуществлялась в программном пакете «Statistica 12» (StatSoft, США) с расчетом средних величин и их стандартной ошибки, медианы и интерквартильного размаха, с использованием критерия Шапиро-Уилка, дисперсионного анализа, критерия Краскела-Уоллиса и Стьюдента с поправкой Бонферрони (число попарных сравнений – 3). Различия считались статистически значимыми при $p \leq 0,05$.

В **третьей главе** представлены результаты собственных исследований. Гигиеническая оценка уровней ЭП и МП ПЧ на наземных рабочих местах персонала электросетевых объектов напряжением 500 и 750 кВ подтвердила наличие превышений ПДУ электрической составляющей, что обуславливает необходимость применения СИЗ в течение рабочей смены для снижения негативного влияния фактора на здоровье электротехнического персонала. Уровни ЭП ПЧ на наземных рабочих местах в зонах прохождения ВЛ достигали 12,50 кВ/м, а на ОРУ – 35,27 кВ/м, что для ВЛ соответствует уровням выше ПДУ для всей рабочей смены, а на ОРУ подстанций – выше максимального ПДУ. На территории всех исследуемых электросетевых объектов не было выявлено превышения ПДУ МП ПЧ.

Математическое моделирование условий экспозиции ЭП и МП ПЧ на рабочих местах персонала, осуществляющего обслуживание и эксплуатацию ВЛ напряжением 500 и 750 кВ, выполненное на основании данных гигиенической оценки с применением разработанных математических моделей, полностью соответствовавших реальным конструкциям ВЛ и условиям воздействия (рис.2), подтвердило необходимость применения СИЗ при проведении работ на высоте вблизи токоведущих частей ВЛ, находящихся под напряжением.

Вблизи фаз ВЛ напряжением 500 кВ уровни напряженности ЭП ПЧ составляют порядка 400 кВ/м (рис.2а), а МП ПЧ – до 1 мТл. При математическом моделировании условий экспозиции ВЛ напряжением 750 кВ уровни напряженности ЭП ПЧ вблизи проводов соответствуют 600 кВ/м (рис.2б), а МП ПЧ – не более 2 мТл.

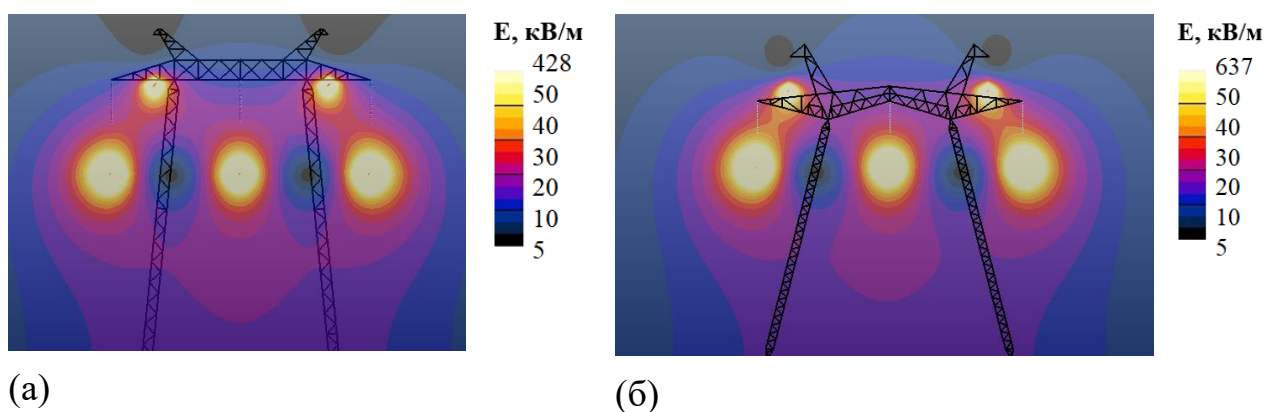


Рисунок 2 – Уровни напряженности ЭП ПЧ в математических моделях ВЛ напряжением 500 кВ (а) и 750 кВ (б)

Анализ результатов, полученных теоретическими и инструментальными методами, показал различия в данных менее 40%, что объясняется наличием артефактов измерений, таких как различный рельеф местности в зонах прохождения ВЛ, нестабильность токовой нагрузки и т.д., а также особенностями математического моделирования (рис.3). Максимальные уровни ЭП и МП ПЧ на наземных рабочих местах отмечены в середине пролета ВЛ при минимальных габаритах проводов.

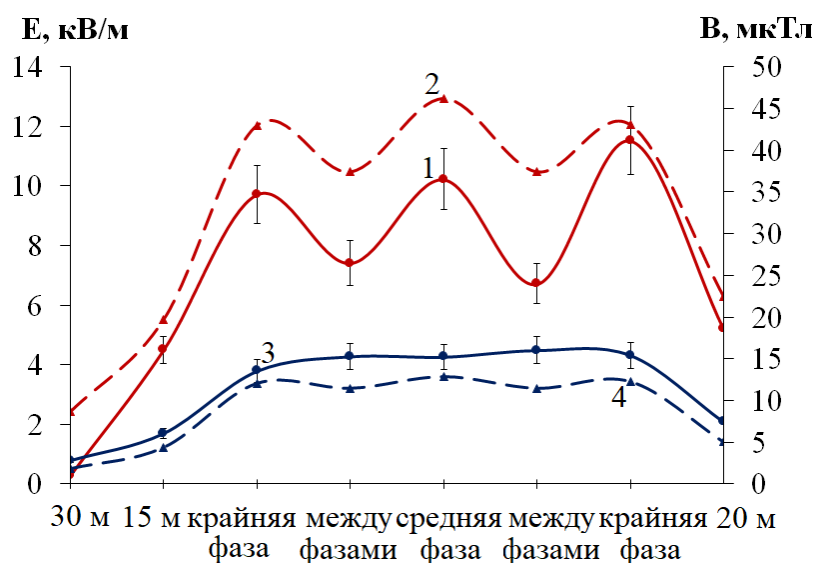


Рисунок 3 – Сравнение инструментальной оценки и математического моделирования для ВЛ напряжением 500 кВ: 1 – инструментальная оценка напряженности ЭП ПЧ (кВ/м); 2 – математическое моделирование; 3 – инструментальная оценка магнитной индукции МП ПЧ (мкТл); 4 – математическое моделирование

Полученные данные дают возможность предполагать хорошую сходимость результатов математического моделирования и инструментальной оценки ЭП и МП ПЧ, что позволяет использовать математические модели для

оценки условий экспозиции работников. Таким образом, оценка интенсивностных параметров ЭП и МП ПЧ на рабочих местах персонала путем математического моделирования с валидацией натурными измерениями позволяет адекватно оценить потенциально негативные условия воздействия ЭП и МП ПЧ на работников и обосновывает необходимые требования к СИЗ при выполнении определенных видов работ.

В связи с этим в соответствии с разработанной методикой проводилась оценка эффективности экранирования 4-х образцов СИЗ, результаты которой показали, что при внешнем ЭП ПЧ до 20 кВ/м на электросетевых объектах и до 80 кВ/м в лабораторных условиях, в том числе при имитации работ под напряжением (на потенциале провода), СИЗ обеспечивают ослабление электрической составляющей до величин на порядок ниже ПДУ для всей рабочей смены ($<0,5$ кВ/м). По результатам оценки эффективности СИЗ комплектация «комбинезон» обеспечивает лучшую защиту персонала от негативного воздействия ЭП ПЧ, а коэффициент экранирования ($K_Э$) исследуемых СИЗ варьируется от 51,17 до 99,49 дБ для различных частей тела человека. При этом $K_Э$, усредненный для всего комплекта, составляет от 60 до 80 дБ (табл.1).

Апробация разработанной методики с применением прямого метода оценки эффективности СИЗ в лабораторных условиях позволила спрогнозировать степень защиты СИЗ отдельных частей тела человека, в том числе при работе на потенциале провода на высоте. При этом анализ полученных данных свидетельствует о возможности применения разработанной методики для различных условий экспозиции, как в лабораторных условиях, так и на рабочих местах.

Таблица 1 – Результаты оценки $K_Э$ отдельных комплектаций СИЗ от ЭП ПЧ ($M \pm \sigma$) на наземных рабочих местах персонала ОРУ 750 кВ и в лабораторных условиях

Комплектация СИЗ	ОРУ напряжением 750 кВ (работы на потенциале земли)	Лабораторные условия (работы на потенциале земли)	Лабораторные условия (работы под напряжением)
	$K_Э$, дБ		
Комбинезон	85,66±3,19	97,28±0,04	93,90±0,06
	71,67±2,11	78,65±0,52	88,45±0,21
Куртка и брюки	61,31±0,64	96,11±0,75	94,29±1,20
	66,77±0,90	64,67±0,47	58,48±2,03

Согласно современным представлениям, степень воздействия ЭП ПЧ на организм определяется его биологическим действием, связанным с плотностью наведенного электрического тока, оценка которого осуществлялась в органах и тканях биологических объектов при планировании экспериментального исследования на животных путем математического моделирования.

По результатам гигиенической оценки эффективности СИЗ для математического моделирования на животных в условиях экранирования был определен $K_{Э} = 50$ дБ, что имитировало наихудшие условия экспозиции человека при использовании экранирующего комплекта.

По данным математического моделирования условий экспозиции животных наибольшая величина плотности наведенного электрического тока при оценке в отдельных органах численных моделей крыс, находившихся в условиях неослабленного ЭП ПЧ, наблюдалась в больших полушариях головного мозга (34 мА/м^2) и при имитации экранирования ЭП ПЧ эта величина снижалась до $97,3 \text{ мкА/м}^2$ (рис.4). У фантомов лабораторных животных, находившихся в неослабленном ЭП ПЧ, плотность электрического тока в тимусе составила $10,4 \text{ мА/м}^2$, а при экранировании ЭП ПЧ уменьшалась до $36,9 \text{ мкА/м}^2$, что свидетельствует о снижении биологически значимого параметра влияния ЭП ПЧ до 350 раз при имитации применения СИЗ.

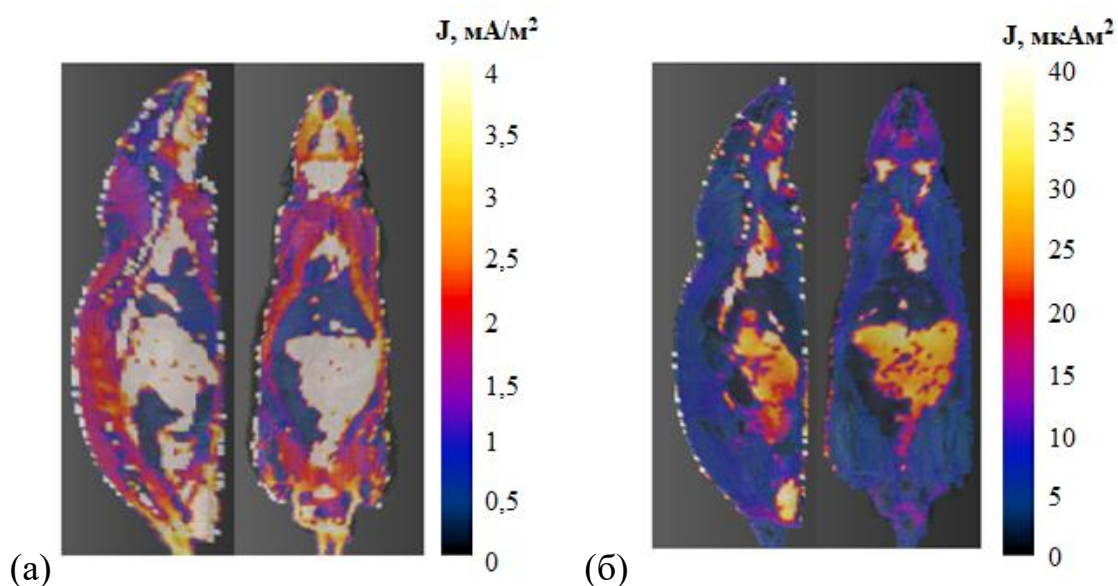


Рисунок 4 – Распределение плотности электрического тока в численных моделях лабораторных животных: (а) без экранирования (10ПДУ); (б) находящихся в условиях экранирования (ниже ПДУ)

Полученные значения плотности электрического тока в разработанных математических моделях лабораторных животных при ослаблении ЭП ПЧ с использованием моделей материалов, имитирующих СИЗ, не превысили порог реакций нервной системы ($<1 \text{ мА/м}^2$), что может предполагать отсутствие значимого влияния ЭП ПЧ при эффективности экранирования более 50 дБ.

При проведении экспериментального исследования на основе данных математического моделирования животные были распределены на 3 группы по 12 особей: истинная экспозиция – неослабленное ЭП ПЧ, истинная экспозиция в условиях экранирования и мнимая экспозиция (контрольная группа).

По результатам экспериментального исследования показатель «энтропии» в опытной группе с истинной экспозицией составлял $35,92 \pm 2,74$ и был ниже, чем в контрольной группе – $51,50 \pm 6,48$ (различия были близки к порогу статистической значимости). В группе, находившейся в условиях экранирования ЭП ПЧ, этот показатель составил $58,83 \pm 7,05$ ($p < 0,05$) после первых суток экспозиции при сравнении с опытной группой (рис.5). На 3 и 5 сутки экспозиции тенденция к снижению значения «энтропии» у крыс опытной группы по сравнению с контрольной и группой в условиях экранирования сохранялась.

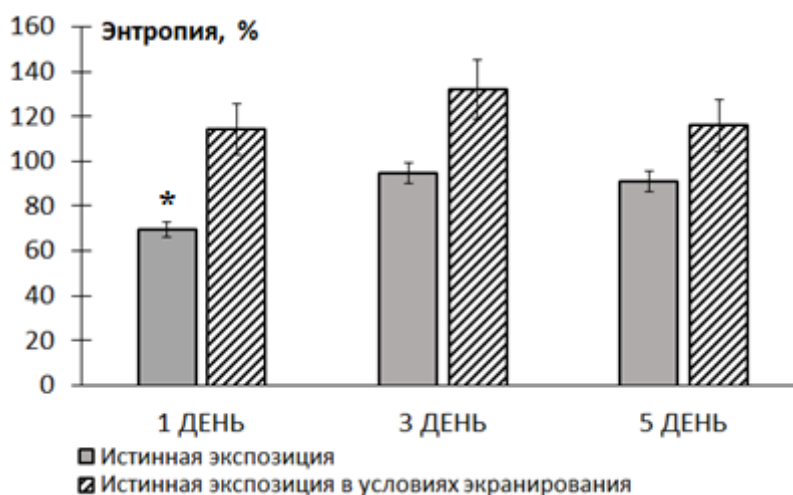


Рисунок 5 – Оценка ориентировочно-исследовательской активности лабораторных животных по интегральному показателю «энтропия» (нормирование по контрольной группе), * – $p < 0,05$

Большинство оцениваемых параметров лейкоцитарной формулы крови у животных опытных и контрольной групп находилась в пределах физиологической нормы. Из данных, представленных в таблице 2, при истинной экспозиции без экранирования видно наличие тенденции к повышению

процентного содержания лимфоцитов после 5-и суток воздействия и снижению процентного содержания моноцитов в сравнении с контрольной группой.

Таблица 2 – Результаты оценки белой крови лабораторных животных ($M \pm m$) после 5 дней экспозиции

Показатель	Мнимая экспозиция (контрольная группа)	Истинная экспозиция	Истинная экспозиция в условиях экранирования
Нейтрофилы палочкоядерные, %	2,00±0,39	1,58±0,43	2,00±0,43
Нейтрофилы сегментоядерные, %	20,42±2,80	17,67±1,43	21,92±2,04
Эозинофилы, %	0,50±0,26	1,00±0,43	0,67±0,22
Базофилы, %	0,00±0,00	0,00±0,00	0,00±0,00
Лимфоциты, %	74,00±3,18	78,00±1,71	72,58±2,31
Моноциты, %	3,00±0,78	1,75±0,18	2,83±0,47

Анализ показателей ПОЛ (табл.3) показал статистически значимые различия в концентрации диеновых конъюгатов ($p < 0,05$) и кетодиенов ($p < 0,01$) между группами животных без экранирования и контрольной, что указывает на чувствительность процессов свободнорадикального окисления к действию ЭП ПЧ. Отсутствие статистически значимых различий между группой животных, находившихся в условиях экранирования, и контрольной позволяет подтвердить биологическую эффективность снижения ЭП ПЧ путем применения экранирующих материалов, используемых при создании СИЗ.

Таблица 3 – Результаты оценки концентрации показателей ПОЛ в плазме крови лабораторных животных ($M \pm m$) после 5 дней экспозиции

Показатель	Мнимая экспозиция (контрольная группа)	Истинная экспозиция	Истинная экспозиция в условиях экранирования
Диеновые конъюгаты, мкмоль/л	122,72±7,53	97,68±4,35*	114,63±6,27
Кетодиены, мкмоль/л	62,29±2,61	79,66±2,56**	69,04±3,18
* – $p < 0,05$; ** – $p < 0,01$			

Результаты экспериментального исследования на животных подтвердили эффективность применения экранирующих материалов для сохранения

нормального функционального состояния ведущих систем организма, обеспечивающих гомеостаз: нейроэндокринной и системы крови.

Физиолого-гигиеническая оценка теплового состояния организма человека при эксплуатации СИЗ от ЭП ПЧ в условиях нагревающей среды показала, что прирост температуры тела к 40-й минуте выполнения физической нагрузки у добровольцев в комбинезоне составлял 0,9 °С, средневзвешенная температура кожи составляла 35,16 °С при исходном значении 32,08 °С. Использование комплектации «куртка и брюки» приводило к меньшему приросту температуры тела (0,8 °С), причем различия средневзвешенной температуры кожи были незначительными по сравнению с применением комбинезона (35,22 °С при исходном значении 32,24 °С на 40-ой минуте). Максимальный прирост величины теплосодержания $\Delta Q_{тс}$ по сравнению с исходным уровнем в комфортных условиях составлял 4,95 и 4,56 кДж/кг при эксплуатации комбинезона и куртки и брюк соответственно (рис.6).

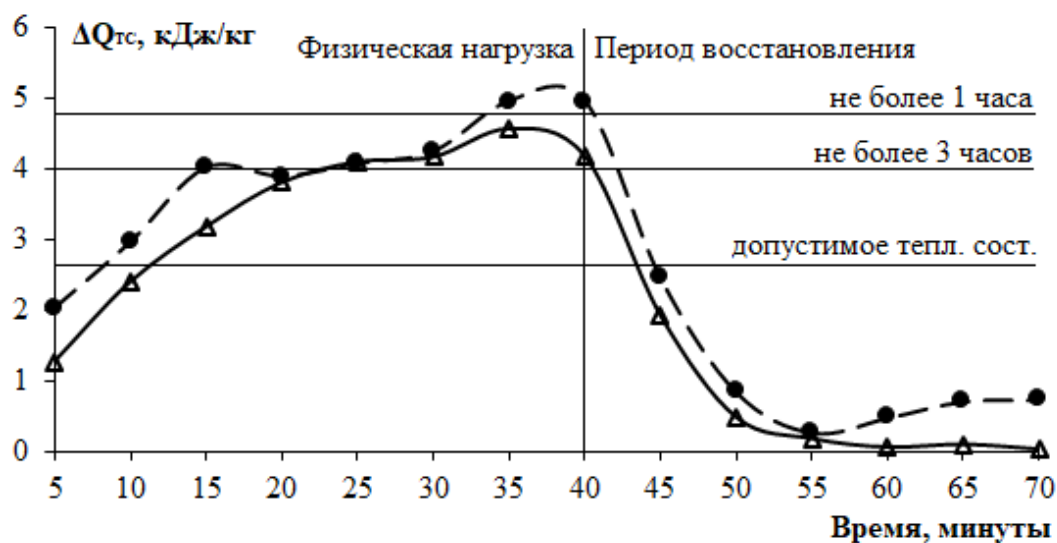


Рисунок 6 – Динамика накопления тепла в организме (по отношению к исходному уровню в комфорте и покое) у добровольцев в зависимости от комплектации используемых СИЗ (● – комбинезон, ▲ – куртка и брюки)

Установлено влияние применения СИЗ на состояние сердечно-сосудистой системы, выраженное в большей степени при эксплуатации комбинезона по максимальному приросту частоты сердечных сокращений (44 уд/мин) по сравнению с 34 уд/мин при применении комплектации «куртка и брюки», что обосновывает необходимость дальнейших физиолого-гигиенических исследований при участии большего количества добровольцев и имитации различных условий нагревающей среды.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований была разработана методика оценки эффективности СИЗ от ЭП ПЧ, позволяющая напрямую сопоставлять полученные уровни электрической составляющей электромагнитного поля с ПДУ, учитывать различные условия работы (потенциал земли и потенциал провода) и оценку уровней ЭП ПЧ для различных частей тела человека, в том числе уделять внимание критически важным органам (голова, грудь).

Исследования на электросетевых объектах позволили апробировать разработанную методику на рабочих местах персонала и обосновать уровни ЭП ПЧ для проведения испытаний в лабораторных условиях. Дальнейшие лабораторные испытания позволили провести оценку эффективности СИЗ при имитации условий работы на потенциале провода, что затруднительно осуществлять в полевых условиях на электросетевых объектах.

Математическое моделирование условий эксперимента на животных дало возможность оценить плотность наведенного тока как основного показателя степени влияния ЭП ПЧ на биологические объекты и обосновать эффективность применения экранирующих материалов, используемых при изготовлении СИЗ, для обеспечения снижения негативного влияния ЭП ПЧ на персонал.

В исследовании по изучению отдельных биологических эффектов воздействия ЭП ПЧ на животных при имитации применения экранирующих материалов, аналогичных используемым в типовых образцах СИЗ, выявлено отсутствие выраженных биологических эффектов в состоянии нейроэндокринной системы и системы крови, что подтверждалось данными расчетов численных значений токов в фантомах животных.

Результаты физиолого-гигиенической оценки теплового состояния добровольцев при применении СИЗ от ЭП ПЧ в условиях нагревающей среды выявили, что применение СИЗ вносит вклад в термическую нагрузку на организм человека. Об этом свидетельствует увеличение температуры тела, средневзвешенной температуры кожи, а также интегрального показателя теплосодержания и частоты сердечных сокращений. Основываясь на полученных предварительных данных, необходимо в будущем при разработке регламентов работы с применением СИЗ от ЭП ПЧ руководствоваться не только ведущим фактором электромагнитной природы, но и определять режимы труда

и отдыха электротехнического персонала с учетом тяжести труда и микроклиматических условий работы.

Полученные результаты и разработанные математические модели условий экспозиции на рабочих местах электротехнического персонала, обслуживающего высоковольтное оборудование, дают возможность проведения прогностической оценки производственных воздействий ЭП и МП ПЧ. Обоснована возможность применения разработанного в рамках настоящей работы системного подхода к оценке эффективности СИЗ от ЭП ПЧ, в том числе с применением методов численной дозиметрии, что послужит важным инструментом в обеспечении сохранения здоровья электротехнического персонала.

ВЫВОДЫ

1. Гигиеническая оценка уровней ЭП и МП ПЧ на наземных рабочих местах персонала электросетевых объектов напряжением 500 и 750 кВ установила наличие превышения ПДУ ЭП ПЧ до 7 раз (35,27 кВ/м) и отсутствие превышений ПДУ МП ПЧ, что обосновывает необходимость применения СИЗ для снижения негативного влияния ЭП ПЧ на организм человека.

2. Разработанные и апробированные математические модели условий экспозиции электротехнического персонала позволили обосновать необходимую степень защиты работников, использующих СИЗ, при работах на высоте (с непосредственным касанием токоведущих частей, находящихся под напряжением) при превышении ПДУ ЭП ПЧ до 120 раз (637 кВ/м), где инструментальный контроль невозможен.

3. Выполненная с помощью разработанной прямой методики, учитывающей несколько точек контроля, оценка эффективности СИЗ показала, что ослабление напряженности ЭП ПЧ составляло до 1,39 В/м внутри СИЗ в области головы и до 0,25 В/м – в области торса, что полностью адекватно для определения соответствия требованиям соблюдения ПДУ и позволило установить степень защиты человека.

4. Оценка величин наведенного ЭП ПЧ плотности тока в тканях и органах математических моделей лабораторных животных позволила определить основные критически важные органы (головной мозг, тимус, селезенка), риск воздействия ЭП ПЧ на которые имеет наибольшую значимость, и установить,

что в условиях экранирования плотность наведенного ЭП ПЧ тока не достигает уровней, соответствующих порогу биологического действия.

5. У животных в условиях воздействия ЭП ПЧ, с уровнем, в 10 раз превышающим ПДУ, была выявлена тенденция к угнетению ориентировочно-исследовательской активности, увеличению содержания лимфоцитов и уменьшению моноцитов в лейкоцитарной формуле крови, статистически значимое уменьшение концентрации диеновых конъюгатов ($97,68 \pm 4,35$ мкмоль/л, $p < 0,05$) и увеличение кетодиенов ($79,66 \pm 2,56$ мкмоль/л, $p < 0,01$) в плазме крови, тогда как в условиях экранирования и мнимого воздействия изменений выявлено не было, что свидетельствует о биологической эффективности/значимости ослабления ЭП ПЧ экранирующими материалами, имитирующими СИЗ.

6. Пробные физиолого-гигиенические исследования теплового состояния добровольцев при эксплуатации СИЗ от ЭП ПЧ позволили определить их вклад в термическую нагрузку на организм работника, отметить наличие сопутствующего фактора физической природы (повышенной температуры) при проведении работ в летний период года.

7. Проведенные исследования позволили научно обосновать комплексный метод гигиенической оценки СИЗ, включающий теоретическую оценку ЭП и МП ПЧ на рабочих местах, где невозможен инструментальный контроль, дозиметрическую и экспериментальную оценку биологической эффективности снижения уровней ЭП ПЧ при использовании экранирующих материалов, имитирующих СИЗ, и разработанную прямую методику оценки защитных свойств СИЗ с учетом теплового состояния человека при их эксплуатации.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Разработка модели условий облучения экспериментальных животных при экранировании напряженности электрического поля промышленной частоты / Перов С.Ю., Белая О.В., Хренникова Т.А. // Техногенные системы и экологический риск: тез. докл. II международной (XV региональной) научной конференции. – Обнинск. – 2018. – с. 381-382.
2. Оценка отдельных биологических показателей в условиях экранирования электрического поля промышленной частоты / Хренникова Т.А., Белая О.В., Перов С.Ю. [и др.] // Окружающая среда и здоровье. Инновационные подходы

в решении медико-биологических проблем здоровья населения: материалы VII Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых и специалистов. – Москва. – 2018. – с. 260-263.

3. Прямой метод оценки экранирующих свойств средств индивидуальной защиты от электрических полей промышленной частоты / Хренникова Т.А., Белая О.В., Перов С.Ю. // Безопасность и охрана труда 2018: труды международной молодежной конференции. – Москва. – 2018. – с. 65-66.
4. Experimental and theoretical assessment of power frequency electric field individual protective means / Perov S.Yu., Belaya O.V., Khrennikova T.A. // Journal of Physics Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2019. – Vol.487, N.1. – 012031.
5. Biological effects of power frequency electric field shielding / Rubtsova N.B., Perov S.Yu., Belaya O.V., Konshina T.A. // Progress in Electromagnetic Research Symposium (PIERS). – Rome, Italy. – 2019. – p. 1445-1448.
6. Two test methods comparison for power frequency electric field shielding materials evaluation / Perov S.Yu., Belaya O.V., Konshina T.A. [et al.] // 21st International Symposium on High Voltage Engineering. – Budapest, Hungary. – 2019. – p. 138-144.
- 7. Совершенствование требований к средствам индивидуальной защиты от электрических полей промышленной частоты / Перов С.Ю., Коньшина Т.А., Макарова-Землянская Е.Н. // Медицина труда и промышленная экология. – Т. 59, № 9. – 2019. – с. 718-719.**
8. Совершенствование методов оценки защитных свойств экранирующих комплектов / Перов С.Ю., Тютюнник Е.В., Белая О.В., Коньшина Т.А. // Современные проблемы медицины труда: материалы всероссийской научно-практической конференции, посвященной 80-летию академика РАН Н.Х. Амирова. – Казань. – 2019. – с. 136-138.
9. Совершенствование метода оценки средств индивидуальной защиты от электрических полей промышленной частоты / Перов С.Ю., Коньшина Т.А. // Актуальные проблемы гигиены, токсикологии и профпатологии: материалы научно-практической конференции молодых ученых и специалистов с международным участием. – Мытищи. – 2019. – с. 83-86.

10. Обоснование современных методов оценки защитных свойств экранирующих комплектов от электрических полей промышленной частоты / Коньшина Т.А., Белая О.В. // Здоровье и окружающая среда: материалы международной научно-практической конференции. – Минск, Республика Беларусь. – 2019. – с.123-126.
11. Влияние условий воздействия на эффективность экранирования средств индивидуальной защиты от электрических полей промышленной частоты / Коньшина Т.А., Аскерова С.А., Шепелева Е.А. // Техногенные системы и экологический риск: тез. докл. III международной (XVI региональной) научной конференции. – Обнинск. – 2020. – с. 311-312.
12. Новые возможности гигиенической оценки электромагнитной обстановки на рабочих местах персонала электросетевых объектов / Рубцова Н.Б., Перов С.Ю., Белая О.В., Коньшина Т.А. // Медицина труда и промышленная экология. – 2020. – Т.60, №9. – с. 569-574.
13. Сравнительная физиолого-гигиеническая оценка средств индивидуальной защиты различной комплектации от электрических полей промышленной частоты / Бурмистрова О.В., Перов С.Ю., Коньшина Т.А. // Медицина труда и промышленная экология. – 2020. – Т.60, №9. – с. 600-604.
14. Оценка экспозиции электрических и магнитных полей промышленной частоты на воздушных линиях электропередачи напряжением 500 и 750 кВ / Коньшина Т.А. // Медицина труда и промышленная экология. – 2020. – Т.60, №11. – с.797-800.
15. Новые требования к средствам индивидуальной защиты от электрических полей промышленной частоты и поражения током наведенного напряжения / Перов С.Ю., Коньшина Т.А., Макарова-Землянская Е.Н. // Медицина труда и промышленная экология. – 2020. – Т.60, №11. – с.849-852.
16. Personal protective equipment screening efficiency depends on power frequency electric field exposure conditions / Perov S.Yu., Belaya O.V., Konshina T.A. [et al.] // Journal of Physics: Conference Series. – 2020. – Vol.1701, N.1. – 165251.

17. Оценка средств индивидуальной защиты типа ЭП-4(0) по показателям теплового состояния человека / Бурмистрова О.В., Перов С.Ю., Коньшина Т.А. // Гигиена и санитария. – 2021. – Т.100, №3. – с. 229-233.
18. Гигиеническое обоснование использования средств индивидуальной защиты на рабочих местах электротехнического персонала / Коньшина Т.А. // Актуальные проблемы профилактической медицины и общественного здоровья: материалы V всероссийской научно-практической конференции молодых ученых. – Москва. – 2021. – с. 122-123.
19. Современные подходы к оценке теплового состояния человека, работающего в нагревающей среде / Гусарова М.В., Коньшина Т.А. // Актуальные проблемы профилактической медицины и общественного здоровья: материалы V всероссийской научно-практической конференции молодых ученых. – Москва. – 2021. – с. 60-61.
20. Физиолого-гигиеническая оценка защитных свойств средств индивидуальной защиты от электрических полей промышленной частоты, изготовленных из различных материалов / Бурмистрова О.В., Коньшина Т.А. // Здоровье и окружающая среда: материалы международной научно-практической конференции. – Минск, Республика Беларусь. – 2020. – с.129-132.
21. Физиолого-гигиеническая оценка средств индивидуальной защиты от электрических полей промышленной частоты при выполнении работ в летний период / Гусарова М.В., Коньшина Т.А. // Техногенные системы и экологический риск: тез. докл. IV международной (XVII региональной) научной конференции. – Обнинск. – 2021. – с. 409-410.
22. Оценка эффективности защиты электротехнического персонала от электрического поля промышленной частоты при выполнении работ на высоте / Коньшина Т.А., Белая О.В. // Экология и здоровье населения: материалы IV Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых. – Иркутск. – 2021. – с. 230-234.