

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ НАУЧНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ «НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ
МЕДИЦИНЫ ТРУДА ИМЕНИ АКАДЕМИКА Н.Ф. ИЗМЕРОВА»
МИНИСТЕРСТВА НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ

На правах рукописи



ДРЕМИН Алексей Игоревич

**НАУЧНОЕ ОБОСНОВАНИЕ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ
ГИГИЕНИЧЕСКИХ ТРЕБОВАНИЙ ПРИ РАБОТАХ НА
ЭЛЕКТРОСЕТЕВЫХ ОБЪЕКТАХ СВЕРХВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ**

3.2.4. Медицина труда

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата биологических наук

Научный руководитель:
доктор биологических наук
Перов Сергей Юрьевич

Москва 2026

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
ГЛАВА 1. ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ	11
1.1. Анализ ведущих факторов производственной среды на рабочих местах электросетевых объектов высокого и сверхвысокого напряжения	11
1.2. Биологические эффекты электрического и магнитного полей промышленной частоты.....	16
1.3. Влияние термической нагрузки, электрических и магнитных полей промышленной частоты на человека	24
1.4. Математическое моделирование и численная дозиметрия.....	35
1.5. Гигиеническое нормирование и принципы защиты электротехнического персонала от электрического и магнитного полей промышленной частоты. Гигиеническое нормирование и регламентация работы в условиях нагревающей среды	38
1.5.1. Гигиеническое нормирование и принципы защиты электротехнического персонала от электрического и магнитного полей промышленной частоты	38
1.5.2. Гигиеническое нормирование и регламентация работы в условиях нагревающей среды.....	42
ГЛАВА 2. ПОСТАНОВКА, ОБЪЕМ, МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ.....	48
2.1. Методы гигиенической оценки электрического и магнитного полей промышленной частоты на рабочих местах электротехнического персонала электросетевых объектов высокого и сверхвысокого напряжения	49
2.2. Методы физиолого-гигиенического исследования теплового состояния добровольцев при эксплуатации средств индивидуальной защиты.....	50
2.3. Методы численного моделирования условий воздействия электрического и магнитного полей промышленной частоты.....	51
2.4. Методы исследований по оценке эффективности средств индивидуальной защиты от воздействия электрического поля промышленной частоты	54

2.5. Методы экспериментального исследования отдельных биологических эффектов воздействия электрического поля промышленной частоты на лабораторных животных	56
2.6. Объем исследований и методы статистической обработки данных	59
ГЛАВА 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ОБСУЖДЕНИЕ	60
3.1. Гигиеническая оценка электрического и магнитного полей промышленной частоты и физиолого-гигиеническая оценка теплового состояния добровольцев при использовании средств индивидуальной защиты на рабочих местах электротехнического персонала	60
3.2. Физиолого-гигиеническая оценка теплового состояния добровольцев при использовании средств индивидуальной защиты на рабочих местах электротехнического персонала	76
3.3. Натурные и лабораторные исследования эффективности средств индивидуальной защиты от электрического поля промышленной частоты	89
3.4. Результаты математического моделирования и анализ условий экспозиции при оценке эффективности средств индивидуальной защиты с учетом биологических эффектов	92
3.5. Экспериментальное исследование и анализ отдельных биологических эффектов воздействия электрического поля промышленной частоты в условиях экранирования	96
3.6. Регламентация труда и отдыха при применении средств индивидуальной защиты в условиях нагревающей среды на основании физиолого-гигиенической оценки теплового состояния организма человека	108
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	111
ВЫВОДЫ	116
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	118
Приложение А	139

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность исследования

Сохранение здоровья трудоспособного населения России при воздействии вредных и опасных факторов производственной среды является актуальной проблемой в условиях научно-технического прогресса и приоритетных направлений развития страны [6]. Электроэнергетика на сегодняшний день является одной из ведущих отраслей экономики Российской Федерации, а повсеместное расширение сферы применения электроэнергии приводит к увеличению количества высоковольтных электроустановок и численности обслуживающего их персонала. Ведущими производственными факторами для электротехнического персонала, осуществляющего ремонт и эксплуатацию электроустановок высокого и сверхвысокого напряжения, таких как открытые распределительные устройства (ОРУ), являются электрическое (ЭП) и магнитное поля (МП) промышленной частоты (ПЧ).

Согласно литературным данным, производственные воздействия ЭП и МП ПЧ с уровнями, превышающими предельно-допустимые (ПДУ), являются фактором риска нарушений со стороны сердечно-сосудистой системы (гипертоническая болезнь, ишемическая болезнь сердца, инфаркт миокарда, раннее начало атеросклероза и др.), нервной системы, повреждения опорно-двигательного аппарата, развития нейродегенеративных заболеваний (прогрессирующей мышечной атрофия, бокового амиотрофического склероз) [20,4,3,82,55,143].

Обеспечение сохранения здоровья электротехнического персонала достигается соблюдением ПДУ ЭП и МП ПЧ, регламентированных санитарно-гигиеническими нормативами, что при превышении ПДУ обеспечивается ограничением времени работы, расстояния до токоведущих частей или применением коллективных и/или индивидуальных средств защиты (СИЗ) [48, 39].

В настоящее время СИЗ от МП ПЧ отсутствуют и применяются иные способы защиты (временем, расстоянием), тогда как, в основном, при эксплуатации высоковольтных установок на рабочих местах отмечается превышение ПДУ ЭП

ПЧ. Одним из наиболее оптимальных способов сохранения здоровья работников, профессионально связанных с воздействием ЭП ПЧ, является применение экранирующих СИЗ типа Эп, которые при выполнении работ на электросетевых объектах обеспечивают снижение уровней ЭП ПЧ до величин, не превышающих ПДУ [8]. Однако, методика оценки эффективности СИЗ от ЭП ПЧ за более чем 30-летний период остается практически неизменной и проводится исключительно по величине ослабления ЭП ПЧ внутри СИЗ, а оценка степени снижения возможных негативных эффектов на отдельные органы и системы организма человека не рассматривается.

Основное время выполнения работ электротехническим персоналом, как правило, приходится на тёплое время года, что влечет за собой эксплуатацию СИЗ от ЭП ПЧ, в основном, в летний период. Комплект СИЗ от ЭП ПЧ, используемый в летний период, состоит из экранирующей куртки со средством защиты головы (электропроводящим наkasником и лицевым экраном), экранирующих брюк, средств защиты рук (электропроводящие перчатки) и средств защиты ног (электропроводящей обуви), соединенных между собой в единый электрический контур (по типу клетки Фарадея). За счет электропроводящих свойств материалов и электрического соединения элементов, СИЗ приобретают экранирующие свойства, выражающиеся в ослаблении уровня внешнего ЭП ПЧ в пододежном пространстве. Однако эксплуатация защитных экранирующих комплектов при выполнении работ в условиях нагревающей среды осложняется их большим весом из-за наличия материалов, содержащих электропроводящие нити, и соединительных выводов с металлическими креплениями, высоким процентом изоляции поверхности тела от окружающей среды, большей теплоизоляцией комплекта, чем это предусмотрено для стандартной спецодежды в летнем исполнении. Поэтому целесообразно обеспечивать не только эффективность защиты от ведущего фактора производственной среды электротехнического персонала, но и учитывать необходимость сохранения функционального состояния организма человека при эксплуатации СИЗ в связи с их вкладом в общую термическую.

Исследования по изучению влияния СИЗ от ЭП ПЧ на функциональное состояние организма человека, выполняющего физическую работу в условиях нагревающей среды, являются основой для разработки мероприятий по защите от перегрева, а именно, регламентации труда и отдыха, которая является важнейшим способом защиты при работе на открытой территории в летний период года.

Степень разработанности темы исследования

Инструментальный контроль ЭП и МП ПЧ, на сегодняшний день, выполним, преимущественно, на удаленных от токоведущего оборудования наземных рабочих местах. Оценка уровней ЭП и МП ПЧ вблизи токоведущих элементов возможна путем математического моделирования, результаты которого нуждаются в экспериментальном подтверждении.

Потенциальные биологические эффекты от использования СИЗ от ЭП ПЧ на данный момент не оцениваются, а оценка эффективности СИЗ сводится к измерению ослабленного ЭП ПЧ внутри комплекта по сравнению с внешним уровнем напряженности ЭП ПЧ. Также стоит отметить, что из-за отсутствия оценки влияния СИЗ на тепловое состояние человека, в ряде случаев может страдать работоспособность и возникать неблагоприятные последствия на функциональные системы организма.

Актуальным представляется совершенствование критериев обеспечения сохранения здоровья персонала с учетом сочетанного действия ведущих факторов производственной среды, в том числе с учетом моделирования и экспериментального изучения эффективности применения материалов СИЗ в обеспечении деятельности ведущих систем организма.

Цель исследования:

на основании гигиенических, дозиметрических и экспериментальных исследований научно обосновать совершенствование гигиенических требований при работах на электросетевых объектах сверхвысокого напряжения

Задачи исследования:

1. Провести гигиеническую оценку уровней ЭП и МП ПЧ и климатических условий на рабочих местах отдельных групп персонала электросетевых объектов высокого и сверхвысокого напряжения.
2. Провести физиолого-гигиеническую оценку теплового состояния организма добровольцев при использовании СИЗ от ЭП ПЧ в условиях нагревающего микроклимата на электросетевых объектах высокого и сверхвысокого напряжения.
3. Провести исследование эффективности СИЗ от воздействия ЭП ПЧ в лабораторных условиях и на электросетевых объектах.
4. Разработать математические модели условий экспозиции ЭП ПЧ для оценки плотности тока в фантомах животных.
5. Провести экспериментальное изучение биологических эффектов ЭП ПЧ при применении экранирующих материалов СИЗ на лабораторных животных.
6. Разработать рекомендации по режимам труда и отдыха при выполнении работ с использованием СИЗ и учетом тепловой нагрузки среды на электросетевых объектах сверхвысокого напряжения.

Научная новизна и теоретическая значимость исследования

Научная новизна исследований состоит в учете сочетанного действия ведущих факторов производственной среды и трудового процесса на состояние здоровья электротехнического персонала при использовании СИЗ от ЭП ПЧ в теплый период года на открытой территории.

Впервые выполненное экспериментальное подострое исследование с применением экранирующих материалов на лабораторных животных, моделирующее эксплуатацию средств индивидуальной защиты электротехнического персонала, позволило оценить биологическую эффективность снижения уровней ЭП ПЧ

Физиолого-гигиеническая оценка теплового состояния организма добровольцев на объектах электроэнергетики дала возможность обосновать регламенты труда и отдыха электротехнического персонала при применении СИЗ в условиях нагревающей среды.

Практическая значимость исследования. Материалы исследования легли в основу разработки:

Изменение №1 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» (вступивший в действие с 30 сентября 2024 г.);

Изменение №1 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» (вступивший в действие с 30 сентября 2024 г.).

Методология и методы исследования. Ключевыми методами при выполнении данного исследования являлись теоретические и эмпирические методы исследований. К числу эмпирических относились: измерения и гигиеническая оценка уровней ЭП и МП ПЧ, гигиеническая оценка климатических параметров, лабораторные экспериментальные исследования, а также исследования на объектах электроэнергетики. Теоретическая часть включала математическое моделирование и дозиметрическую оценку. Определение защитных свойств СИЗ проводилось по двум показателям: величине напряженности ЭП ПЧ внутри комплекта и силе стекающего наведенного электрического тока. Оценка теплового состояния добровольцев проводилась по интегральному показателю теплового состояния человека. Обработка результатов включала методы статистической обработки данных с применением современного программного обеспечения.

Положения, выносимые на защиту:

Обеспечение снижения неблагоприятного влияния ЭП ПЧ на электротехнический персонал объектов электроэнергетики напряжением 220-750 кВ при использовании экранирующих СИЗ в условиях повышенных температур окружающей среды ($\geq 30^{\circ}\text{C}$) обуславливает необходимость регламентации труда и отдыха с перерывом не менее 20 минут в течение каждого часа работы, что

подтверждено результатами исследований в лабораторных и производственных условиях.

Ослабление ЭП ПЧ при применении экранирующего материала типового комплекта СИЗ обеспечивает снижение плотности наведенных токов в теле лабораторных животных, что подтверждено результатами численной дозиметрии и отсутствием достоверных различий изменений резистентности мембран эритроцитов и отдельных показателей системы крови в подостром эксперименте. Тогда как при превышении ПДУ ЭП ПЧ (2-10 раз) отмечались достоверные изменения тех же показателей при увеличении плотности наведенных токов.

Степень достоверности и апробация результатов исследования.

Достоверность результатов проведенных исследований подтверждается достаточным объемом исследований, применением современных гигиенических, дозиметрических и экспериментальных методов исследования, использованием объективных методов оценки защитных свойств СИЗ в условиях производственных воздействий, актуальных методов статистической обработки данных с определением статистически достоверных параметров.

Основные положения диссертационной работы обсуждались на Семнадцатой всероссийской (девятая международная) научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Энергия-2022» (Иваново, 2022), Международной научной конференции «Техногенные системы и экологический риск» (Обнинск, 2022, 2023, 2024, 2025), всероссийской научно-практической интернет-конференции молодых ученых и специалистов Роспотребнадзора с международным участием «Гигиена, экология и риски здоровью в современных условиях» (Саратов, 2022), 4-ом Международном Молодёжном Форуме «ПРОФЕССИЯ и ЗДОРОВЬЕ» (Светлогорск, 2022), международной научно-практической конференции «Здоровье и окружающая среда» (Минск, 2022, 2023, 2024, 2025), всероссийской научно-практической конференции молодых ученых «Экология и здоровье населения» (Ангарск, 2023, о. Ольхон, п. Хужир 2025), всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Профилактическая медицина-2023» (Санкт-Петербург, 2023), всероссийской

научной конференции с международным участием «Медицина труда: проблемы сохранения профессионального здоровья в России на рубеже первой и второй четверти XXI века» (Санкт-Петербург, 2024).

Личный вклад автора. Автор принимал участие в формулировке цели и задач, постановке, планировании, обосновании методологии и методов исследований, в создании математических моделей, проведении экспериментальных исследований, сборе и анализе данных, обработке и анализе результатов, подготовке публикаций. Участие автора в разработке – 85%, проведении исследований – 95%, обработке и анализе результатов – 95%.

Публикации. Основные результаты диссертационной работы опубликованы в 20 научных работах, из которых 7 статей опубликовано в рецензируемых научных изданиях, включенных в перечень международных реферативных баз данных и систем цитирования ВАК при Министерстве науки и высшего образования РФ, 3 из которых опубликованы в журналах по направлению 3.2.4. Медицина труда.

Связь работы с научными программами.

Диссертационная работы выполнена в рамках тем научно-исследовательских работ ФГБНУ «НИИ МТ»:

- НИР № FGFE-2022-0002 «Изучение биологического действия и научное обоснование совершенствования гигиенического нормирования и контроля электромагнитных полей современных систем связи и коммуникаций»;
- НИР № FGFE-2025-0003 «Научное обоснование совершенствования критериев обеспечения сохранения здоровья человека при воздействии электромагнитных полей, создаваемых инновационными источниками, в условиях технологического развития российской федерации».

Структура и объем диссертационной работы.

Диссертационная работа состоит из введения, трех глав, заключения, выводов, списка литературы и 1 приложения. Работа изложена на 140 с., содержит 31 рисунок и 10 таблиц. Список литературы содержит 162 источника, из них 55 отечественных и 107 зарубежных.

ГЛАВА 1. ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

1.1. Анализ ведущих факторов производственной среды на рабочих местах электросетевых объектов высокого и сверхвысокого напряжения

В настоящее время электроэнергетика занимает одно из ключевых мест среди отраслей народного хозяйства Российской Федерации. Непрерывное развитие энергетической инфраструктуры, масштабное строительство и модернизация электросетевых объектов высокого и сверхвысокого напряжения, а также расширение сфер применения электроэнергии обуславливают устойчивый рост количества энергетических объектов и усложнение условий их эксплуатации.

Развитие электроэнергетического сектора сопровождается увеличением численности электротехнического и оперативно-ремонтного персонала, занятого обслуживанием и эксплуатацией электроустановок высокого и сверхвысокого напряжения. В ходе профессиональной деятельности работники подвергаются воздействию комплекса вредных и опасных факторов производственной среды, ведущими из которых являются ЭП и МП ПЧ 50/60 Гц [36, 19].

В РФ в настоящее время существуют электрические сети следующих классов напряжения (1000 В и выше) [9]:

- 1-35 кВ (средний класс напряжения);
- 110-220 кВ (высокий класс напряжения);
- 330-750 кВ (сверхвысокий класс напряжения);

Воздушные линии электропередачи высокого и сверхвысокого напряжения, открытые и закрытые распределительные устройства (ОРУ и ЗРУ), коммутационные аппараты, защитно-автоматические устройства, измерительные приборы, соединительные шины, контактная сеть переменного тока железнодорожного транспорта, а также разнообразное электрооборудование промышленного, научного и медицинского назначения выступают основными источниками высокоинтенсивных ЭП и МП ПЧ [20, 34, 43, 46, 63].

В исследовании по оценке уровней ЭП ПЧ, создаваемых двумя параллельно расположенными ВЛ напряжением 220 кВ, отмечалось, что в середине пролетов значения составляли 1,76 кВ/м, а максимально зафиксированный уровень достигал 3,2 кВ/м [147]. При повышении класса напряжения ВЛ до 400 кВ наблюдалось превышение установленного в РФ ПДУ за всю рабочую смену в 2 раза (10,2 кВ/м) [68]. Измерения на территории ВЛ напряжением 500 кВ показали наличие уровней напряженности ЭП ПЧ до 14 кВ/м под крайней фазой в середине пролета, а среднее значение напряженности ЭП ПЧ в пределах трассы ВЛ составляло 8,8 кВ/м [44]. Другие измерения, проведенные на территории ВЛ того же класса напряжения, показали схожую ситуацию. Уровни напряженности ЭП ПЧ под проекциями крайних фаз в середине пролета достигали 11,5 кВ/м, а под проекцией средней фазы – 10,2 кВ/м [37, 32]. Измерения уровней ЭП ПЧ на территории двух ВЛ напряжением 500 кВ, расположенных параллельно друг другу, показали, что под крайними фазами одной из ВЛ уровни напряженности ЭП ПЧ варьировались от 10,9 до 12,5 кВ/м, а под крайними фазами другой – от 7 до 9 кВ/м [31]. Измерения напряженности ЭП ПЧ, проведенные вдоль двух параллельных друг другу ВЛ напряжением 750 кВ, показали, что максимальные уровни отмечались в проекциях крайних фаз и достигали 9-10 кВ/м для первой ВЛ и 7-9 кВ/м для второй [31].

Анализ электромагнитной обстановки, которая создается высоковольтным оборудованием на подстанциях и распределительных устройствах различного класса напряжения, показал наличие уровней напряженности ЭП ПЧ выше по сравнению с зонами прохождения ВЛ.

Результаты натурных измерений уровней напряженности ЭП ПЧ на ОРУ 110 кВ показали, что на подстанции с данным классом напряжения отмечалось превышение ПДУ для РФ, поскольку уровни ЭП ПЧ были выше 5 кВ/м [113]. На ОРУ 220/230 кВ уровни ЭП ПЧ варьировались от 2 до 12 кВ/м в зависимости от точки измерения и ее удаления от высоковольтного оборудования [77].

В другом исследовании уровней напряженности ЭП ПЧ на подстанции напряжением 220 кВ также получены значения, достигавшие 12-14 кВ/м [153]. На картах распределения ЭП ПЧ можно наблюдать превышение отечественного

норматива для всей рабочей смены на более чем 40% всей территории подстанции 220 кВ.

На подстанции более высокого класса напряжения 400 кВ наибольшие уровни напряженности ЭП ПЧ в зависимости от точек измерения достигали 24 кВ/м, а усредненные значения на всей территории составляли 12 кВ/м [109]. Другое исследование на подстанции 400 кВ также показало, что уровни напряженности ЭП ПЧ на объекте данного класса напряжения достигали 22 кВ/м [131].

Результаты гигиенической оценки на наземных рабочих местах электротехнического персонала двух ОРУ 500 кВ отмечали наличие превышений ПДУ и уровни ЭП ПЧ до 21 кВ/м, что указывает на максимальное время работ не более 10 минут без использования средств индивидуальной защиты (СИЗ) [30, 33].

На ОРУ 750 кВ, как правило, уровни напряженности ЭП ПЧ достигают значения, при котором ограничение времени работ уже не выполнимо (до 31 кВ/м), а работники допускаются на объект только в СИЗ [30].

Исследование уровней напряженности ЭП ПЧ на подстанции, на которой расположены сразу 3 ОРУ различного класса напряжения (110, 500 и 1000 кВ) показало, что не всегда увеличение класса напряжения ведет к увеличению напряженности ЭП ПЧ на территории подстанции, что связано с увеличением высоты токоведущих частей, применением расщеплённых фаз, а также особенностями планировки и увеличением габаритов ОРУ 1000 кВ. В ходе исследования максимальные уровни ЭП ПЧ достигали 5,06 кВ/м на ОРУ 110 кВ, а на ОРУ 500 и 1000 кВ – 10 кВ/м [113].

Согласно результатам специальной оценки условий труда ПАО «Россети» на рабочих местах электротехнического персонала (электромонтер по ремонту ВЛ, электромонтер по обслуживанию подстанций, электромонтер по ремонту ОРУ и др.) подстанций напряжением 220 кВ и выше установлен класс условий труда – 2 (допустимый) по всем производственным факторам, присутствующим на объектах [42]. Однако проведенный анализ литературных источников показал превышение ПДУ ЭП ПЧ как на ВЛ напряжением от 400 кВ, так и на ОРУ напряжением 110 кВ

и выше. Соответственно, для данных электросетевых объектов класс условий труда должен составлять 3.1 и выше [40].

Напряженность ЭП определяется в первую очередь классом напряжения электросетевого объекта и остается постоянной в процессе эксплуатации, тогда как вторая составляющая электромагнитного поля (ЭМП), магнитная индукция, определяется током рабочего напряжения и зависит от нагрузки.

Анализ магнитной составляющей ЭМП ПЧ, создаваемого ВЛ напряжением 220 кВ, показал, что индукция МП варьировалась в пределах 2,6-2,8 мкТл [147]. Для более высокого класса напряжения ВЛ 400 кВ уровни магнитной индукции были выше и достигали 15 мкТл [68].

В зоне прохождения ВЛ напряжением 500 кВ максимально зафиксированные уровни напряженности МП ПЧ достигали 7 А/м, а среднее значение вдоль трассы ВЛ не превышало 5 А/м [44]. Аналогичные исследования индукции МП, создаваемого ВЛ 500 кВ, показали, что максимально зафиксированные уровни не превышали 10 мкТл [32].

В схожем исследовании по измерению уровней индукции МП ПЧ на ВЛ 500 кВ зафиксированные значения были в 3 раза выше, чем в предыдущих работах, и варьировались от 23,6 до 32,1 мкТл [31].

На ВЛ 750 кВ, по данным литературных источников, уровни индукции МП ПЧ в среднем составляли 10-18 мкТл [31].

На территории подстанции 110/400 кВ измеренные уровни индукции МП ПЧ варьировались от 2 до 55 мкТл в зависимости от точки измерения [152].

При измерении уровней магнитной индукции вблизи трансформаторов на подстанции 400 кВ уровни достигали 350 и 700 мкТл [131]. На ОРУ 500 кВ уровни индукции МП ПЧ в двух аналогичных исследованиях отличались примерно в 50 раз. В первом случае максимальное значение не превышало 12 мкТл, а во втором достигало 580 мкТл [137, 30].

На ОРУ 750 кВ также не наблюдалась тенденция к увеличению индукции МП ПЧ с увеличением класса напряжения объекта, и максимально зафиксированный уровень не превышал 55 мкТл [30].

Различия в величинах МП ПЧ для одного класса напряжения могут быть обусловлены нагрузкой сети, которая, зачастую, ниже номинальной, поэтому для оценки реальной величины МП ПЧ измеренные уровни, как правило, пересчитываются на максимальный (за год) рабочий ток.

Анализ электромагнитной обстановки, создаваемой различным высоковольтным оборудованием на ОРУ подстанций различного класса напряжения, показал, что уровни напряженности и индукции МП ПЧ, зачастую, в разы больше, чем уровни на ВЛ, что связано, как и в случае с ЭП ПЧ, с габаритами токоведущих частей, а также с особенностью расположения высоковольтного оборудования на территории ОРУ.

Выполнение профессиональной деятельности электротехнического персонала на открытой территории проводится, как правило, в летний/теплый период года, что обусловлено различными причинами: технологическими, экономическими, техническими и т.д. При этом, превышение ПДУ на рабочих местах требует применения СИЗ в целях защиты работника от воздействия основного вредного производственного фактора, которые затрудняют тепловлагообмен человека с окружающей средой.

Изменения со стороны кардиореспираторной системы, дестабилизация клеточной мембраны, гипоксия тканей, нарушение метаболизма и водно-электролитного баланса являются неблагоприятными последствиями, связанными с перегревом организма, при котором страдают функциональные системы, обеспечивающие температурный гомеостаз [5, 157, 159]. Перегрев, в свою очередь, является следствием затрудненного тепловлагообмена с окружающей средой и рассматривается как фактор риска нарушения функционального состояния [20,62,121]. Возникает он при выполнении физической работы в летний период года, когда использование СИЗ от ЭП ПЧ дает дополнительную термическую нагрузку на фоне нагревающего микроклимата. Таким образом, персонал электросетевых объектов при работах на открытом воздухе в теплый сезон, помимо ведущего производственного фактора, может подвергаться перегреву с описанными последствиями [5, 20]

Анализ литературных данных показал, что на электросетевых объектах высокого и сверхвысокого напряжения вредным ведущим фактором является ЭП ПЧ, причем, превышение ПДУ может составлять более, чем в 5 раз, поэтому электротехнический персонал в процессе своей трудовой деятельности использует экранирующие комплекты типа Эп, защитный принцип которых построен на принципе клетки Фарадея. Использование электропроводящего материала и полного комплекта СИЗ, изолирующего практически полностью поверхность тела человека, в теплое время года на открытой территории вносит дополнительную термическую нагрузку на организм человека. Поэтому целесообразно рассматривать сочтенное влияние ведущего производственного фактора и тепловой нагрузки, возникающей при применении СИЗ.

1.2. Биологические эффекты электрического и магнитного полей промышленной частоты

Воздействие ЭП и МП сверхнизкочастотного диапазона, в первую очередь, ПЧ (50/60 Гц) на биологические объекты обусловлено работой высоковольтного оборудования. Длина волны на частоте 50 Гц составляет порядка 6000 км, что многократно превышает линейные размеры тела человека. В этих условиях отсутствуют волновые процессы распространения и поглощения энергии, характерные для радиочастотного диапазона.

Согласно современным представлениям, механизм действия ЭМП сверхнизкочастотного диапазона объясняется влиянием наведенных (индуцированных) электрических токов на возбудимые биологические ткани, в частности нервной и мышечной систем [108, 110]. В отличие от высокочастотных воздействий, где доминирует тепловой эффект, при частотах 50/60 Гц нагрев тканей пренебрежимо мал, а биологическое действие носит преимущественно электрофизиологический характер [58].

Величина и распределение вихревого наведенного тока в теле человека зависит от целого ряда параметров: таких, как размер, форма, анатомическое

строение тела, электрические и магнитные свойства тканей (диэлектрическая и магнитная проницаемость и удельная проводимость), ориентация тела относительно векторов электрического и магнитного полей [6].

Плотности наведенного тока могут быть рассчитаны по формулам для ЭП [6, 24]:

$$j = kfE, \quad (1.1)$$

где f – частота, E – напряженность ЭП, k – коэффициент, отличающийся для различных тканей;

и МП:

$$j = \pi R \sigma f B, \quad (1.2)$$

где B – магнитная индукция, σ – электрическая проводимость ткани, R – размер биологического объекта.

Важным фактором, определяющим величину и распределение наведенных токов, является частотная дисперсия электропроводности и диэлектрической проницаемости биологических тканей. Биологические среды обладают выраженной альфа-дисперсией в диапазоне частот от единиц герц до мегагерц, обусловленной поляризацией клеточных мембран и межфазных границ [23].

Биологическая ткань в переменном поле характеризуется комплексной проводимостью и комплексной диэлектрической проницаемостью, отражающими одновременное наличие активной составляющей – омической проводимости, обусловленной движением ионов, а также реактивной (ёмкостной) составляющей – связанной с поляризацией структурных элементов ткани. Частота 50/60 Гц располагается в самой низкочастотной части α -дисперсии. Это имеет принципиальные биофизические последствия: максимальная диэлектрическая проницаемость; минимальная эффективная проводимость мембран; выраженная неоднородность распределения токов [23].

Механизм биологического действия ЭП ПЧ выражается в нарушении регуляции физиологических функций организма. ЭП ПЧ воздействует на различные отделы нервной системы, при этом повышение возбудимости центральной нервной системы (ЦНС) происходит вследствие рефлекторного

действия поля, а тормозной эффект – результат прямого воздействия поля на структуры головного и спинного мозга [20, 22].

Плотность электрического тока 10-50 мкА/см² является пороговой для стимуляции сенсорных рецепторов нервных и мышечных клеток. Длительное протекание тока (плотность – 1 мкА/см² и больше) в жизненно важных биологических тканях (миокард) сопровождается определенными отрицательными последствиями для здоровья человека [20, 22].

Зависимость биологических эффектов ЭП и МП ПЧ от плотности наведенного электрического тока являлась основополагающей для установления международных рекомендаций.

В низкочастотной области электромагнитного спектра биологические ткани демонстрируют исключительно высокие значения эффективной диэлектрической проницаемости, достигающие величин порядка 10^6 и более. Данный эффект обусловлен прежде всего емкостными свойствами клеточных мембран, которые формируют выраженные поляризационные барьеры на границе внутриклеточной и внеклеточной сред. В результате при воздействии ЭП ПЧ перераспределение зарядов и протекание наведенных токов осуществляется главным образом по внеклеточным проводящим путям, представленным межклеточной жидкостью и сосудистым руслом. Высокое сопротивление плазматической мембраны существенно ограничивает проникновение ЭП внутрь клетки, вследствие чего цитоплазматическое пространство оказывается в значительной степени защищённым от прямого действия ЭП ПЧ, а внутриклеточные структуры вовлекаются в процесс лишь опосредованно.

Принципиально иная ситуация складывается при воздействии МП ПЧ. В отличие от ЭП, биологические ткани практически «прозрачны» для МП, поскольку их магнитная проницаемость в подавляющем большинстве случаев близка к единице и практически не отличается от магнитной проницаемости вакуума. Вследствие этого внешнее МП ПЧ проникает в тело человека практически без ослабления, а вторичные МП, возникающие за счёт электрических токов,

индуцированных в тканях, имеют малую интенсивность и не оказывают существенного влияния на распределение МП внутри организма [107].

Проникновение МП ПЧ в проводящие среды организма сопровождается возникновением внутреннего ЭП, формируемого в соответствии с фундаментальными законами электромагнитной индукции. Внутреннее ЭП является причиной появления так называемых вихревых токов – замкнутых токовых контуров, циркулирующих внутри биологических тканей. Возникающее таким образом неоднородное распределение плотности вихревых токов лежит в основе электрофизиологических эффектов МП ПЧ и определяет его биологическое действие [139].

За последние 10–15 лет наблюдается устойчивое сокращение числа научных публикаций, посвящённых исследованию потенциально неблагоприятного воздействия ЭП и МП ПЧ (50/60 Гц) как на человека, так и на лабораторных животных. Одной из ключевых причин снижения актуальности данной проблемы является формирование международного научного консенсуса относительно отсутствия доказанных вредных эффектов при воздействии ЭП и МП ПЧ на уровнях, не превышающих установленные гигиенические нормативы. Данный консенсус отражён в позиционных документах Всемирной организации здравоохранения (WHO), согласно которым результаты эпидемиологических, клинических и экспериментальных исследований не демонстрируют убедительных доказательств причинно-следственной связи между воздействием ЭП и МП ПЧ и развитием неблагоприятных эффектов для здоровья, за исключением слабой и непоследовательной ассоциации с детской лейкемией при длительном воздействии МП выше 0,3–0,4 мкТл [76, 155]. При этом ВОЗ подчёркивает, что биологический механизм такой связи не установлен, а экспериментальные данные на животных не подтверждают канцерогенный эффект.

Аналогичная позиция отражена в рекомендациях Международной комиссии по защите от неионизирующих излучений (ICNIRP), которая в обновлённых руководствах указывает, что единственным достоверно установленным механизмом воздействия ЭП и МП ПЧ на организм человека являются наведённые

/индуцированные токи и электрическая стимуляция возбудимых тканей при высоких уровнях воздействия [90, 102]. На основании этого ICNIRP в 2010 и 2020 годах подтвердила значения контролируемых предельно допустимых уровней воздействия (10 кВ/м для ЭП и 1 мТл для МП для профессионального контингента), отметив отсутствие экспериментальных и клинических данных, свидетельствующих о необходимости их пересмотра. Международное агентство по изучению рака (IARC), в свою очередь, классифицировало МП ПЧ как «возможно канцерогенные для человека» (группа 2B), подчеркнув, что данная классификация основана исключительно на ограниченных эпидемиологических данных и не подтверждена результатами исследований на животных и данными о механизмах действия [100].

В совокупности данные выводы международных экспертных организаций привели к снижению приоритетности фундаментальных исследований потенциальных биологических эффектов ЭП и МП ПЧ в научных и грантовых программах. В условиях ограниченных ресурсов акцент современных исследований сместился в сторону прикладных задач – мониторинга уровней ЭМП, оценки профессиональных рисков, совершенствования методик измерений и контроля соответствия нормативным требованиям. Таким образом, уменьшение числа публикаций за последние 10-15 лет отражает не утрату научного интереса к проблеме, а её переход в категорию регулируемых и контролируемых факторов производственной и экологической среды.

В экспериментальных исследованиях, выполненных на лабораторных животных за последние 10 лет, получены результаты, свидетельствующие о влиянии ЭП ПЧ на некоторые показатели цитоморфологического состава крови [116].

Исследование хронического воздействия ЭП ПЧ напряженностью 4 кВ/м (имитация ВЛ напряжением 220 кВ) на лабораторных крыс в течение 400 дней показало статистически значимое ($p < 0,01$) увеличение количества лейкоцитов [122]. Также было отмечено изменение некоторых биохимических показателей крови (аланинаминотрансфераза, общий белок, альбумин, общий, прямой и

непрямой билирубин и азот мочевины). Полученные данные подтверждают, что длительное воздействие ЭП ПЧ с уровнями напряженности, близкими к ПДУ, установленными в РФ, может приводить к изменению свойств крови крыс, демонстрируя очевидный биологический эффект.

Другое исследование показало, что при воздействии ЭП ПЧ напряженностью 5 кВ/м в течение 30 дней на лабораторных крыс отсутствуют существенные различия в показателях цельной крови между опытной и контрольной группами [134]. Однако отмечалось увеличение плотности иммуно-положительных клеток в ткани головного мозга, что может указывать на возможное повреждение тканей головного мозга при длительном воздействии ЭП ПЧ.

Исследование воздействия ЭП ПЧ частотой как 50, так и 60 Гц, и напряженностью 10 кВ/м на лабораторных мышей в течение 1 часа показало подавление стресса, вызванного иммобилизацией у мышей [95]. Также авторами отмечено статистически значимое увеличение количества эритроцитов, уровня гемоглобина и гематокрита ($p < 0,001$) в опытной группе по сравнению с контрольной [95].

Исследование потенциально негативного действия ЭП ПЧ напряженностью 24 кВ/м в течение 7 дней и 8 часов в день на морских свинках показало достоверное увеличение малонового диальдегида у животных опытной группы по сравнению с группой мнимого воздействия [145].

Исследования на лабораторных мышах показало, что воздействие ЭП ПЧ напряженностью 35 кВ/м в течение 7 дней приводило к достоверному снижению количества лейкоцитов в крови животных [71]. Однако показатель вернулся к нормальному уровню через 14 и 21 день экспозиции благодаря компенсаторной реакции организма. Также авторы отмечали значительное снижение концентрации гемоглобина после 21 дня воздействия ЭП ПЧ, что может способствовать иммунной дисфункции.

Более ранние исследования, связанные с изменением гематологических показателей при воздействии ЭП ПЧ с уровнями напряженности, превышающими ПДУ, также указывали на тенденцию к снижению количества лейкоцитов [88, 126,

127]. Однако аналогичные исследования ряда других авторов указывали на совершенно иную ситуацию, при которой достоверные отличия в количестве белых клеток крови отсутствовали [55, 79, 120, 133, 138].

Было установлено, что хроническое воздействие ЭП частотой 60 Гц и напряженностью 80 кВ/м вызывало значительное снижение общего количества лейкоцитов у крыс после 120 дней экспозиции [135].

Исследование потенциально негативного влияния ЭП ПЧ напряженностью от 100 до 290 кВ/м в течение 24 часов на мышей показало, что суточное воздействие напряженностью 170, 220 и 290 кВ/м приводило к статистически значимому увеличению числа микроядер в полихроматофильных эритроцитах, достигавшему максимума через 72 часа последействия фактора [73].

Исследования по оценке потенциально негативного влияния МП ПЧ индукцией 100 мкТл в течение 3 месяцев на крыс подтвердило отсутствие негативного воздействия на систему кроветворения (гематограмму) и биохимические показатели крови, включая функции печени и почек [112].

Это подтверждается и другим исследованием потенциального неблагоприятного воздействия МП ПЧ на лабораторных крыс, которое показало, что воздействие МП напряженностью 30, 100 и 500 мкТл по 20 часов в день в течение 24 недель не повлияло на гемограмму, химический состав крови, фиброз или окислительный стресс в печени и почках у крыс [160].

Результаты исследований влияния на крыс МП ПЧ с индукцией 30, 100 и 500 мкТл в течение 24 недель (по 20 часов в день) показали отсутствие значимых изменений в гематограмме, биохимическом составе крови, функциях печени и почек, а также отсутствие признаков фиброза или окислительного стресса в этих органах [161].

Кроме того, наибольший уровень воздействия МП ПЧ (500 мкТл) в течение 24 недель на крыс не оказал влияния на сердечно-сосудистую систему, включая стабильность артериального давления, частоту сердечных сокращений и отсутствие признаков патологического ремоделирования миокарда [162].

Воздействие МП ПЧ с индукцией 10 мкТл и 1 мТл в течение 5 дней на очищенные гемопоэтические клетки-предшественники человека не показало существенного влияния фактора на пролиферацию, кинетику, ультраструктуру или клоногенный потенциал клеток [118].

Однако в экспериментальном исследовании по влиянию МП ПЧ индукцией от 1 до 2000 мкТл в течение 60 дней на крыс отмечалось неоднозначное влияние на центральную нервную систему: было зафиксировано улучшение сохранения памяти (ретенции), при этом наблюдалось развитие тревожного поведения и рост маркеров окислительного стресса в организме [106].

При более длительном воздействии от 2 часов до 7 дней при уровнях МП ПЧ от 6 мкТл до 2 мТл на стволовые клетки костного мозга крыс отсутствовали изменения в процессах апоптоза или жизнеспособности кроветворных клеток-предшественников линии FDCP-mix(A4) [129].

В исследовании влияния МП ПЧ на клетки костного мозга мышей индукцией 80 мТл в течение 7–10 дней было показано 10%-ное снижение пролиферации и дифференцировки предшественников гранулоцитов-макрофагов (CFU-GM), а также снижение числа стромальных стволовых клеток исключительно у самок [151].

Исследования комбинированного хронического воздействия ЭП и МП ПЧ в течение 8 месяцев на крыс с уровнями 1 кВ/м и 5 мкТл, а также 5 кВ/м и 100 мкТл, не показали патологических морфологических изменений, за исключением незначительного увеличения плотности миелоидных клеток, остававшегося в пределах физиологической нормы [158].

Проведенный анализ литературных источников по оценке влияния ЭП и МП ПЧ на биологические объекты указывает на наличие неблагоприятных эффектов в системе крови. В ряде исследований отмечались изменения лейкоцитарного звена, проявлявшиеся как увеличением, так и снижением количества лейкоцитов, что может отражать реакцию иммунной системы на действие физического фактора. В отдельных работах также зарегистрированы изменения уровня гемоглобина, количества эритроцитов и интегральных показателей цельной крови, а также

колебания некоторых биохимических параметров. Однако имеются исследования, в которых достоверных изменений гематологических показателей выявлено не было.

Помимо гематологических показателей, в отдельных работах описаны признаки стресс-реакции организма, а также влияние фактора на центральную нервную систему, что косвенно может отражаться на регуляции кроветворения и иммунных процессов через нейроэндокринные механизмы.

С учетом важной роли системы крови в поддержании гомеостаза организма, иммунной защиты и транспортных функций, выявленные изменения могут рассматриваться как возможный фактор риска развития функциональных нарушений системы кроветворения при длительном воздействии ЭП и МП ПЧ.

1.3. Влияние термической нагрузки, электрических и магнитных полей промышленной частоты на человека

В период 1930–1940-х годов активное терапевтическое применение высокочастотных электромагнитных полей (ЭМП) сопровождалось изучением их физико-химических и биологических эффектов — наиболее интенсивно эти процессы протекали в Германии, а также в СССР и США [23]. Немного позже, в 1960-е годы, сформировался научный интерес к потенциальным неблагоприятным последствиям воздействия ЭП и МП ПЧ. Обмен накопленными данными между США, СССР и государствами Восточной Европы произошёл в 1973 году в Варшаве в ходе первого Международного симпозиума по биологическим эффектам электромагнитных излучений и их вредоносному влиянию на организм человека (International Symposium «Biological Effects and Health Hazards of Microwave Radiation») [23, 61].

Принципиальные расхождения в гигиенических нормативах США и СССР отражали фундаментальные различия в научных взглядах того времени относительно механизмов биологического действия ЭМП ПЧ. Американский национальный стандарт базировался на последствиях острых, однократных

воздействий. В отличие от него, советская система гигиенического нормирования основывалась на эффектах хронического воздействия, выявленных преимущественно при исследовании центральной нервной системы с помощью поведенческих и электрофизиологических методик. Дополнительно учитывалась клиническая симптоматика, регистрировавшаяся у лиц, длительно экспонированных в ЭМП [23].

В отечественной науке интерес к возможным неблагоприятным эффектам ЭП и МП ПЧ возник в связи с появлением сведений о неврологических жалобах субъективного характера у персонала, эксплуатирующего высоковольтные подстанции [3, 4, 17, 21]. Первые систематические наблюдения свидетельствовали о повышенной утомляемости, головных болях, сонливости и снижении трудоспособности у работников, обслуживавших подстанции напряжением 500–750 кВ, при которых напряжённость ЭП достигала 20–26 кВ/м [21].

В одной из самых ранних работ 1963 г. исследовали персонал, обслуживающий электроустановки напряжением до 500 кВ, и впервые зафиксировали жалобы работников на расстройства нервной системы (головная боль, апатия) и функциональные сдвиги в сердечно-сосудистой системе (брадикардия), что послужило сигналом о возможных эффектах воздействия ЭП и МП ПЧ на персонал электросетевых объектов высокого напряжения [4]. В 1966 году были представлены расширенные данные о состоянии здоровья 45 работников ОРУ 400-500 кВ, у которых были выявлены выраженные вегетативные дисфункции и изменения в морфологическом составе периферической крови (незначительный ретикулоцитоз) [3]. Исследование показало прямую зависимость тяжести симптомов от длительности пребывания в зонах, где напряженность ЭП ПЧ достигала 20-25 кВ/м.

Представление результатов отечественных исследований на международном уровне послужило основанием для проведения аналогичных работ в других странах.

Результаты обследования персонала испанских подстанций до 400 кВ выявили стойкие нарушения вегетативной нервной системы при работе в ЭП ПЧ

напряженностью до 15 кВ/м [82]. В исследованиях отмечались жалобы работников на повышенную раздражительность, хроническую усталость, головные боли, а также снижение либидо. Позднее исследования были расширены и оценивалась система кровообращения у персонала электросетевых объектов сверхвысокого напряжения: отмечалась лабильность артериального давления, склонность к синусовой брадикардии, изменения в периферическом кровоснабжении, проявлявшиеся в субъективных ощущениях похолодания конечностей и объективном изменении наполнения капилляров, а в ряде случаев фиксировались функциональные изменения на ЭКГ [83]. Главным выводом стало предположение, что при напряженности ЭП ПЧ выше 15-20 кВ/м в теле человека индуцируются токи, сопоставимые по своим эффектам с легким физиологическим шоком, что приводит к глубоким изменениям в регуляторных функциях организма [83].

Другое исследование влияния ЭП ПЧ на персонал подстанций 500 кВ при схожих уровнях (15-20 кВ/м) отмечало тенденцию к умеренному лейкоцитозу у персонала, а также незначительные колебания артериального давления и пульса [105].

В ходе эпидемиологического исследования при участии персонала объектов высокого напряжения была выявлена корреляция между стажем работы и развитием сердечно-сосудистой патологии (артериальная гипертензия, ишемия), также отмечалось, что хроническое воздействие МП ПЧ с уровнями индукции от 0,5 до 4 мкТл является значимым фактором риска для сердечно-сосудистой системы [55].

У персонала подстанции 132 кВ, который производил работы под напряжением без отключения питания, было выявлено снижение уровня мелатонина в плазме крови и активности антиоксидантного фермента эритроцитов, увеличение уровня малонового диальдегида и оксида азота в плазме крови [144]. При продолжении исследований в 2015 году зафиксировано увеличение уровня адреналина и признаки фрагментации ДНК в лимфоцитах, что свидетельствует о глубоком биохимическом отклике организма на воздействие фактора [143].

Серия работ, направленных на обследование персонала различных подстанций высокого напряжения в Иране, подвергавшегося хроническому воздействию ЭП и МП ПЧ, подтвердила наличие биологического эффекта при уровнях, не превышающих установленные международные нормы. Авторы установили связь между воздействием фактора и развитием скелетно-мышечных расстройств (боли в пояснице, шее, коленях), а также доказали, что индукция МП (в среднем 2,5–5 мкТл) провоцируют окислительный стресс, который повреждает ткани суставов и мышц, снижая их регенеративный потенциал [99].

Было выявлено значительное ухудшение качества сна, рост уровня стресса, депрессии и тревожности у работников, подвергавшихся хроническому воздействию ЭП и МП ПЧ [98]. При проведении глубокого анализа генетического аппарата работников электростанций было зафиксировано статистически значимое повреждение ДНК (методом кометного электрофореза) в лимфоцитах периферической крови [96]. Авторы связали эти генотоксические эффекты с длительным стажем работы в условиях повышенной напряженности ЭП и МП ПЧ, что указывает на риск отдаленных мутагенных последствий [96]. Изучение влияния фактора на иммунную и кроветворную системы отмечало повышение уровней провоспалительных цитокинов (интерлейкинов) и изменение в лейкоцитарной формуле (увеличение количества лейкоцитов, процентного содержания лимфоцитов, количества эритроцитов, средний корпускулярный объем, количества тромбоцитов и прокальцитонина) [97].

Эпидемиологические исследования, проведенные в Российской Федерации среди персонала электросетевых объектов напряжением 500 кВ, были направлены на оценку потенциальной онкоопасности хронического профессионального воздействия ЭП и МП ПЧ. В ряде работ была выявлена тенденция к повышению риска смерти от гемобластозов, в частности, от лейкозий и лимфом, у работников, подвергавшихся воздействию ЭП и МП ПЧ с уровнями до 28 кВ/м и 21,8 А/м соответственно [16, 52, 53]. При этом авторы подчеркивали, что большинство выявленных ассоциаций не достигало статистической значимости и часто наблюдалось на фоне общего снижения показателей смертности, что существенно

ограничивает интерпретацию причинно-следственных связей. Полученные данные могут рассматриваться как свидетельство возможного слабого эпидемиологического сигнала, требующего осторожного анализа с учётом влияния сопутствующих факторов риска и особенностей профессионального контингента.

В исследованиях, выполненных на территории Республики Казахстан среди электротехнического персонала, обслуживавшего ОРУ напряжением 220 и 500 кВ, была проанализирована структура заболеваемости в зависимости от основных производственных факторов. У работников выявлялась корреляция между воздействием ЭП и МП ПЧ и заболеваниями нервной системы, системы кровообращения, а также опорно-двигательного аппарата [89]. Отмечалось, что выявленные взаимосвязи носят преимущественно корреляционный характер и не позволяют однозначно выделить ЭП и МП ПЧ в качестве ведущего этиологического фактора, однако указывают на возможную роль хронического воздействия в формировании функциональных нарушений на фоне комплексного влияния факторов производственной среды.

Исследование, выполненное с участием добровольцев из числа электротехнического персонала подстанций напряжением 225 и 400 кВ в регионе Парижа, показало, что длительное профессиональное воздействие ЭП и МП ПЧ сопровождалось изменениями в системе антиоксидантной защиты [146]. У обследованных работников отмечалось повышение уровня малонового диальдегида и снижение активности ключевых антиоксидантных ферментов - супероксиддисмутазы и глутатионпероксидазы. При этом авторы указывали, что выявленные изменения носили умеренный характер и не сопровождались клинически значимыми нарушениями, что позволяет рассматривать их как проявления компенсаторной адаптационной реакции организма.

Сходные выводы были получены в исследовании хронического профессионального воздействия ЭП и МП ПЧ, которое ассоциировалось с умеренными изменениями биохимических показателей, повышением уровня малонового диальдегида, снижением активности антиоксидантных ферментов и увеличением частоты микронуклеусов [117]. Несмотря на статистическую

значимость выявленных эффектов, авторы подчеркивали их слабую биологическую выраженность и сохранение показателей в пределах физиологической адаптационной нормы. Полученные результаты интерпретировались как признаки возможного окислительно-индуцированного клеточного стресса, не имеющего подтвержденных клинических последствий.

Таким образом, исследования, выполненные преимущественно до конца 1990-х годов, позволили сформировать первоначальные представления о возможных биологических эффектах профессионального воздействия ЭП и МП ПЧ. Для этого периода характерно преобладание описательных и эпидемиологических работ, основанных на анализе субъективных жалоб, клинических наблюдений и ограниченного набора функциональных и гематологических показателей. Полученные данные зачастую указывали на наличие функциональных изменений со стороны нервной, сердечно-сосудистой и кроветворной систем, однако отличались высокой вариабельностью результатов, неоднородностью выборок и недостаточным контролем сопутствующих факторов производственной среды.

В то же время, отсутствие единых методологических подходов к оценке уровней воздействия, а также различия в дизайне исследований существенно осложняли сопоставление результатов, что не позволило сформировать однозначные выводы о характере и степени риска для здоровья человека.

Работы последних 10-15 лет характеризуются качественно иным уровнем методического исполнения и сосредоточены преимущественно на изучении клинических и клеточных эффектов воздействия. В современных исследованиях широко применяются биохимические маркеры окислительного стресса, показатели антиоксидантной защиты, маркеры повреждения ДНК и апоптоза, а также стандартизированные методы оценки экспозиции [16, 52-53, 89, 96-98, 117, 143-144, 146]. При этом внимание исследователей смещается от поиска выраженных клинических проявлений к анализу адаптационных реакций организма и потенциальных ранних биохимических маркеров воздействия.

Влияние нагревающей среды на организм человека характеризуется не только воздействием климатических условий (высокие уровни температуры окружающей среды, относительной влажности, солнечной радиации, скорости движения воздуха), но и выделением метаболического тепла организмом человека в процессе выполнения физической работы, приводя к развитию такого явления, как тепловой стресс. Тепловой стресс, в свою очередь, может привести к развитию так называемого теплового напряжения (heat strain) – компенсаторной реакции организма человека, направленной на нормализацию теплового баланса.

В случае недостаточной эффективности компенсаторных реакций могут возникать различные патологические состояния, связанные с тепловым воздействием, такие как тепловой удар, тепловой обморок, тепловая сыпь, в более тяжелых случаях, отягощенных выраженным тепловым воздействием на организм человека, могут возникать случаи рабдомиолиза и острого повреждения почек [119].

При температуре окружающего воздуха более 26°C возрастает частота случаев заболеваний, связанных с тепловым воздействием, особенно среди неакклиматизированных работников, выполняющих тяжелую физическую работу: подъем и удержание грузов, интенсивная работа руками и спиной, ходьба в быстром темпе. Отягчающими факторами являются отсутствие доступа к прохладному вентилируемому помещению и холодной воде в периоды отдыха во время работы на открытой территории, а также использование СИЗ [87, 119].

При работе в условиях нагревающей среды в организме человека происходит перенапряжение терморегуляторных механизмов, что приводит к изменениям в деятельности различных органов и систем, а также к снижению работоспособности и производительности труда.

В условиях нагревающей среды при выполнении работ, связанных с физической активностью, с увеличением значений температуры воздуха уменьшается градиент температуры от «ядра» к поверхности, что может быть связано с повышенным кровоснабжением кожного покрова и также приводить к снижению максимального потребления кислорода организмом [45].

Увеличение значения внутренней температуры тела всего на $0,3^{\circ}\text{C}$ повышает скорость потоотделения и расширяет поверхностные сосуды кожи, что сопровождается нарушением вегетативной регуляции сердечно-сосудистой системы [86].

Повышение температуры ядра на 3°C может привести к критическому перенапряжению терморегуляторных и физиологических реакций, направленных на поддержание температурного гомеостаза, в тяжелых случаях приводя даже к летальному исходу [62, 69].

При нахождении в состоянии относительного покоя процессы теплопродукции организма направлены на энергетическое обеспечение базовых физиологических процессов таких как дыхание и сердцебиение, необходимые для снабжения клеток кислородом и питательными веществами [69, 91]. Известно, что при работе в нагревающей среде снижается эффективность механизмов теплоотдачи путем конвекции и радиации, а теплотери испарением (влагопотери с потом) возрастают.

Влияние нагревающей среды на дыхательную систему. В результате гипертермии в организме человека происходят изменения в показателях газообмена, в частности, увеличивается минутный объем дыхания (МОД), значения которого линейно увеличиваются с повышением температуры «ядра» [150]. МОД увеличивается на 5-10 литров в минуту при повышении температуры «ядра» на 1 градус [150, 92]. Вследствие гипервентиляции при физической нагрузке в нагревающей среде также может наблюдаться снижение уровня CO_2 (гипокапнии) и парциального давления CO_2 в артериальной крови [84, 93]. Сочетанное воздействие нагревающей среды и физической нагрузки приводит к увеличению потребления O_2 и выделению CO_2 [29].

Влияние нагревающей среды на водно-солевой баланс. Физическая нагрузка в условиях нагревающей среды в течение длительного времени приводит к гипогидратации (обезвоживанию), что сопровождается гиповолемией и гиперосмоляльностью плазмы крови [69]. К основным электролитам в составе пота, который выделяется в больших количествах при физической работе, относятся

хлорид натрия, калий, кальций и магний, концентрация которых зависит от рациона питания, скорости потоотделения, уровня гидратации и степени адаптации к нагревающей среде [65].

Дегидратация организма человека, выполняющего физическую работу, приводит к усталости, нарушению мозгового кровообращения [148-149]. Уровень влагопотерь, соответствующий 2% от массы тела человека, наиболее часто встречается у работников, занятых на открытой территории при высоких значениях температуры окружающего воздуха [64, 132]. К симптомам дегидратации относятся усталость, головокружение, спутанность сознания, в особенно тяжелых случаях могут возникать делирий, кома, часты явления летального исхода [75, 115].

Вследствие гиперосмоляльности плазмы крови нарушается потоотделение и наблюдается недостаточное расширение сосудов кожи, необходимое для теплоотдачи испарением, а также оказывает влияние на вентиляцию легких [85].

Активное потоотделение, являясь одним из основных путей нормализации температурного гомеостаза, приводит, однако, к большим потерям жидкости и жизненно важных электролитов, таких как NaCl, которые необходимо своевременно и полноценно восполнять в целях предупреждения возникновения гиповолемических состояний [60].

Влияние нагревающей среды на сердечно-сосудистую систему. Сердечно-сосудистая система человека реагирует на воздействие нагревающей среды комплексом различных компенсаторно-приспособительных реакций, направленных на рассеивание избытка тепла в организме в окружающую среду. Основными реализуемыми механизмами являются повышение частоты сердечных сокращений, ударного объема сердца, минутного объема кровообращения. За счет перераспределения кровотока от глубоких сосудов внутренних органов и мышц к поверхностным сосудам кожи уменьшается объем оксигенизированной крови, необходимой для адекватного кровоснабжения задействованных при физической нагрузке мышц, таким образом наблюдается снижение производительности труда работников [80, 130].

При тепловом стрессе сердечный выброс увеличивается до 2-х раз за счет увеличения частоты сердечных сокращений и ударного объема в результате увеличения инотропной (контракtilьной) функции миокарда в зависимости от продолжительности и тяжести воздействия нагревающей среды [69].

Хронотропный эффект влияния температуры окружающего воздуха на деятельность сердечно-сосудистой системы связан с увеличением частоты сердечных сокращений посредством прямого воздействия температуры на миокард и повышенного симпатического и парасимпатического воздействия на клетки синоатриального и атриовентрикулярного узлов (активность вегетативной нервной системы) [69, 86-87].

Совокупность влияния теплового стресса на деятельность сердечно-сосудистой системы приводит к нарушению притока крови и насыщения кислородом жизненно важных органов и тканей, таких как мозг [69].

Влияние нагревающей среды на работоспособность и производительность труда. По данным группы исследователей, при работе в нагревающей среде в течение 1 часа наблюдалось снижение физической работоспособности от 5 до 16% [136]. Повышение температуры ядра на 2-2,5 градуса приводило к ухудшению выполнения сложных двигательных задач [124]. Умеренное обезвоживание (влагопотери до 1%) увеличивало частоту ошибок, снижение умственной работоспособности [154]. Сочетанное влияние обезвоживания и гипертермии приводило к наибольшему снижению производительности труда при выполнении комбинированных моторно-когнитивных задач [84].

Влияние средств индивидуальной защиты. Влияние использования СИЗ на тепло- и влагообмен организма человека состоит в том, что одежда служит барьером между кожей человека и окружающей средой [91, 119]. При выполнении работ в условиях нагревающей среды избыток тепла и влаги скапливаются в тканях СИЗ, что создает определенный дискомфорт работнику.

Главными характеристиками СИЗ, позволяющими оценить характер тепло- и влагопередачи, а также тепловой комфорт при их использовании работниками, являются паро-, воздухо- и влагопроницаемость, тепло- и пароизоляция [140].

Главной проблемой при создании СИЗ является их излишний вес, что связано с защитными свойствами, а вес СИЗ от ЭП ПЧ из-за электропроводящих материалов может достигать 5 кг. При разработке и производстве СИЗ учитывают, в основном, только их защитные свойства, нивелируя тем самым эргономическими и теплофизическими характеристиками.

Анализ литературных данных показывает, что воздействие ЭП и МП ПЧ на человека может сопровождаться рядом функциональных и биологических изменений, включая повышенную утомляемость, головные боли, апатию, сонливость, снижение работоспособности, нарушения со стороны нервной, вегетативной и сердечно-сосудистой систем, а также сдвиги в морфологическом составе периферической крови, лейкоцитоз, признаки окислительного стресса и др. Выполнение работ на электросетевых объектах часто сопровождается дополнительной тепловой нагрузкой, связанной с воздействием нагревающей среды, физической активностью и использованием СИЗ от ЭП ПЧ.

Сочетание повышенной температуры окружающей среды, физической нагрузки и ограниченного тепло- и влагообмена при использовании СИЗ приводит к развитию теплового стресса и теплового напряжения, сопровождающихся перенапряжением механизмов терморегуляции, дегидратацией, нарушением водно-солевого баланса, усилением нагрузки на сердечно-сосудистую и дыхательную системы, а также снижением физической и умственной работоспособности. Таким образом, при оценке потенциальных рисков для здоровья электротехнического персонала необходимо учитывать сочетанное влияние факторов производственной среды, поскольку воздействие нагревающего микроклимата и использование СИЗ могут усиливать функциональное напряжение физиологических систем организма и усугублять неблагоприятные эффекты, потенциально связанные с воздействием ЭП и МП ПЧ.

1.4. Математическое моделирование и численная дозиметрия

Математическое моделирование условий воздействия ЭП и МП ПЧ частотой 50/60 Гц в настоящее время является одним из ключевых инструментов гигиенической, биофизической и инженерной оценки электромагнитной обстановки на электросетевых и промышленных объектах высокого и сверхвысокого напряжения [59]. Актуальность применения методов моделирования обусловлена рядом факторов.

Во-первых, современные электросетевые объекты высокого и сверхвысокого напряжения характеризуются сложной конфигурацией токоведущих частей и неоднородным распределением ЭП и МП ПЧ. Проведение натурных измерений во всех потенциально опасных зонах, зачастую, технически затруднено, экономически нецелесообразно, либо связано с повышенным риском для персонала.

Во-вторых, в международных рекомендациях предельно допустимые уровни ЭП и МП ПЧ основываются на биологических эффектах, связанных с дозиметрическим показателем – величиной плотности наведенных токов в тканях организма. Указанные величины не применяются непосредственно в действующих нормативных документах Российской Федерации, однако используются как научная основа при интерпретации результатов расчетных и экспериментальных исследований.

В-третьих, возрастает потребность в прогнозируемой оценке условий труда и риска воздействия ЭП и МП ПЧ на этапах проектирования, модернизации и реконструкции электросетевых объектов, а также при обосновании эффективности применения средств индивидуальной и коллективной защиты. В этих условиях математическое моделирование становится фактически безальтернативным инструментом научного анализа [24].

Для расчета ЭМП ПЧ широко применяются такие численные подходы, как метод конечных разностей, метод конечных элементов, метод векторного потенциала тока, импедансного аналога электромагнитного пространства. Они

широко используются в моделировании взаимодействия ЭМП с биологическими структурами, так как биофизические эффекты требуют точного учета распределения поля внутри гетерогенных объектов [128].

Основным преимуществом математического моделирования служит возможность оценки параметров воздействия ЭМП на биологические объекты, которые невозможно зафиксировать при проведении экспериментальных исследований. Несмотря на высокую информативность, математическое моделирование ЭП и МП ПЧ имеет ряд принципиальных ограничений.

Точность расчётов в значительной степени определяется корректностью исходных данных: геометрии объекта, электрических характеристик тканей, граничных условий и параметров источников поля. Упрощения и допущения неизбежно вносят неопределённость в результаты.

Существующие численные фантомные модели человека и животных, даже высокодетализированные, не полностью отражают индивидуальную анатомическую и физиологическую вариабельность, включая различия в электропроводности тканей, позе, ориентации тела относительно векторов напряженности поля.

Моделирование не учитывает возможные адаптационные и функциональные реакции организма, которые могут проявляться при хроническом воздействии ЭП и МП ПЧ и выходят за рамки чисто физического описания.

Также стоит отметить, что высокая вычислительная сложность трёхмерных моделей ограничивает их применение в рутинной санитарно-гигиенической практике и требует значительных вычислительных ресурсов и квалификации.

В связи с этим математическое моделирование следует рассматривать как дополняющий, а не заменяющий метод, который должен использоваться совместно с натурными измерениями и биологическими экспериментами.

По результатам численного моделирования для достижения пороговой средней плотности тока по всему телу в 1 мА/м^2 , как показали исследования, необходимы уровни внешнего поля $8,26 \text{ кВ/м}$ или $0,30 \text{ мТл}$ [70]. При этом плотность тока выше пороговой наблюдалась в таких органах и тканях, как

щитовидная железа, простата, надпочечники, мышцы, желчный пузырь, кровь и спинномозговая жидкость.

Изучение наведенных ЭП и плотности тока в органах взрослого человека и 5-летнего ребенка при моделировании воздействия однородного вертикального ЭП ПЧ 60 Гц напряженностью 1 кВ/м показало, что максимальная плотность тока в головном мозге составляла 444 мкА/м², в спинном мозге – 427 мкА/м², в сердце – 443 мкА/м², тогда как в мышцах и крови 2909 мкА/м² и 4012 мкА/м² соответственно [94]. У ребенка значения плотности тока в большинстве органов численного фантома оказались ниже, чем у взрослого.

Изучение распределения внутренних ЭП в теле фантома человека вблизи ВЛ напряжением 110 кВ и током 600 А с использованием воксельной модели высокого разрешения показало, что среднеквадратичное наведенное ЭП в головном мозге составило 0,0029 В/м, в сердце – 0,0038 В/м, в спинном мозге – 0,0047 В/м. [67].

Исследование влияния ЭП ПЧ, создаваемого ВЛ напряжением 200 кВ, на внутренние органы фантома человека (мозг, сердце, почки) на различных расстояниях от опоры, продемонстрировало, что величины наведенных токов зависят от дистанции: на расстоянии 10 метров от центра опоры наведенные токи в мозге составляли $2,44 \cdot 10^{-7}$ А, в сердце – $1,58 \cdot 10^{-7}$ А, в почках – $1,44 \cdot 10^{-6}$ А [81].

Математическое моделирование внутренних ЭП в фантоме человека в условиях сложной электромагнитной обстановки подстанции 110/400 кВ показало, что внутреннее ЭП распределяется неравномерно, а максимальные значения зафиксированы в кортикальной кости – 254 мВ/м, а также в белом веществе головного мозга – 19,8 мВ/м [111].

Анализ литературных данных показал, что математическое моделирование является одним из ключевых инструментов дозиметрической оценки электромагнитного воздействия на организм человека, поскольку такие показатели, как плотность наведенных токов и внутренние ЭП в тканях, носят исключительно расчетный характер и не могут быть измерены в условиях натурных исследований. Наиболее перспективным методом для решения задач гигиенической оценки воздействия ЭП и МП ПЧ является метод конечных

разностей, обеспечивающий возможность моделирования трехмерных гетерогенных биологических фантомов при относительно высокой вычислительной мощности.

Максимальные уровни индуцированных токов при математическом моделировании условий воздействия ЭП и МП ПЧ отмечались в крови, мышечной ткани и костном мозге, тогда как в центральной нервной системе и сердце значения ниже, что объясняется различиями электропроводности тканей, их геометрии и распределения жидкости в организме.

1.5. Гигиеническое нормирование и принципы защиты электротехнического персонала от электрического и магнитного полей промышленной частоты. Гигиеническое нормирование и регламентация работы в условиях нагревающей среды

1.5.1. Гигиеническое нормирование и принципы защиты электротехнического персонала от электрического и магнитного полей промышленной частоты

При выполнении профессиональной деятельности электротехнический персонал подвергается влиянию ряда физических факторов производственной среды, которые подлежат гигиеническому нормированию и контролю. Обеспечение сохранения здоровья электротехнического персонала, обслуживающего высоковольтные электроустановки, как в России, так и за рубежом, основывается на гигиенической регламентации уровней ЭП и МП ПЧ. В настоящее время отечественные и зарубежные ПДУ ЭП и МП ПЧ в производственной среде различаются в связи с разными критериями оценки вредности фактора и их методологическими подходами (Таблица 1.5.1).

В СанПиН 1.2.3685-21 ПДУ напряженности ЭП и МП ПЧ зависят от времени нахождения человека в зоне воздействия [48]. Регламентация производственных воздействий ЭП ПЧ (50 Гц) в России является одной из наиболее строгих в мире,

ПДУ для всей рабочей смены составляет 5 кВ/м. Для обеспечения возможности ограниченного по времени пребывания персонала в условиях превышения ПДУ ЭП ПЧ для всей рабочей смены от 5 кВ/м до 20 кВ/м используется пересчет, а при напряженности от 20 до 25 кВ/м время пребывания составляет 10 минут за рабочую смену [39]. При уровне напряженности ЭП ПЧ 25 кВ/м и выше производство работ без применения СИЗ не допускается [39].

Для рабочей смены продолжительностью 8 часов ПДУ МП ПЧ при общем воздействии составляет 100 мкТл, а при превышении ПДУ время работы определяется по кривой интерполяции [39, 48]. Время пребывания работника в зоне с уровнем 2 мТл для общего воздействия составляет не более 1 ч.

Таблица 1.5.1 – Нормативные значения ЭП и МП ПЧ в соответствии с международными гигиеническими требованиями [156]

Страна	Электрическое поле, кВ/м	Магнитное поле, мкТл
Китай	5	80
Российская Федерация	5 (25)	100 (2000)
Республика Южная Корея*	8,33	416,2
Иран	10	500
Израиль		
Сингапур		
Швейцария		
Австралия	10 (30)	500 (5000)
Австрия	10 (20)	1000 (6000)
Бельгия		
Болгария		
Великобритания и Северная Ирландия		
Греция		
Дания		
Кипр		
Италия		
Нидерланды		
Норвегия		
Финляндия		
Франция		
Швеция		

Продолжение Таблицы 1.5.1

Страна	Электрическое поле, кВ/м	Магнитное поле, мкТл
Венгрия	10	1000
Словения		
Хорватия		
Германия	14,14 (28,2)	1400 (8400)
США*	25	1000
Аргентина	25	1200
* – частота ЭП и МП 60 Гц		

В зарубежных нормативных документах на рабочих местах, за исключением Южной Кореи, ПДУ ЭП ПЧ установлены, в основном, Directive 2013/35/EU не ниже 10 кВ/м (таблица 1.5.1 для низких уровней воздействия), а также ограничивают искровые разряды [20, 77, 101]. Высокие уровни (кратковременное) воздействие составляет не менее 20 кВ/м и допускает наличие искровых разрядов в рабочей среде при условии соблюдения защитных мер [20].

В целом, анализ гигиенических документов по регламентации ЭП и МП ПЧ на рабочих местах указывает на то, что в большинстве зарубежных стран ПДУ напряженности ЭП ПЧ превышают установленные в РФ нормативные значения в 2-5 раз, а магнитной индукции – до 10 раз, что подчеркивает разные методологические подходы в оценке потенциально негативных последствий для здоровья человека в условиях действия фактора.

На рабочих местах персонала, связанного с обслуживанием и эксплуатацией систем генерации, передачи и распределения электроэнергии переменного тока ПЧ, высоковольтного оборудования промышленного, научного и медицинского назначения, силового судового оборудования и железнодорожного транспорта, гигиеническая оценка ЭП и МП ПЧ проводится согласно МУК 4.3.2491-09 [27] во всех местах возможного пребывания работников [84]. Стоит отметить, что по отечественной методике измерения проводятся на расстоянии 0,5 м от оборудования и конструкций, стен зданий и сооружений [27]. Зарубежные методы определяют расстояние между измерительным прибором и окружающими объектами как 1 м для обеспечения достаточной точности измерения [104].

Методика гигиенической оценки ЭП и МП ПЧ, регламентирующая контроль уровней на разных высотах от опорной поверхности (1,5 м – грудь, 1,8 м – голова), основывается на высоте критически важных органов организма человека, тогда как в методиках ЕС измерения ЭП и МП ПЧ выполняются только на одном уровне – 1 м от опорной поверхности. Такие подходы также свидетельствуют не только о возможности расхождения контролируемых уровней действующего фактора, но и в целом о расхождении в оценке потенциально негативного действия при обеспечении сохранения здоровья человека.

Анализ предельно допустимых уровней ЭП и МП ПЧ, установленных в различных странах, показывает, что требования, действующие в Российской Федерации, наиболее строгие по сравнению с международными нормативами. Так, для кратковременного воздействия в большинстве зарубежных стран допустимые уровни напряженности ЭП находятся в диапазоне 8–25 кВ/м, а МП – 416–1400 мкТл и выше, тогда как в Российской Федерации предельно допустимый уровень для ЭП (в течение всего рабочего дня) составляет 5 кВ/м, а для МП – 100 мкТл, что существенно ниже аналогичных нормативов, принятых в ряде государств. Следует отметить, что при установлении отечественных гигиенических нормативов учитывалось прежде всего хроническое воздействие ЭМП на человека в условиях длительной профессиональной деятельности, что обусловило более строгий характер ограничений. В то же время международные рекомендации, применяемые во многих странах, в основном, ориентированы на предупреждение острых биофизических эффектов при кратковременном воздействии, что объясняет более высокие допустимые уровни. Таким образом, действующая в Российской Федерации система гигиенического нормирования ЭП и МП ПЧ отличается более строгим подходом и ориентирована на обеспечение безопасности при длительном воздействии в производственных условиях.

1.5.2. Гигиеническое нормирование и регламентация работы в условиях нагревающей среды

Микроклимат относится к одному из воздействующих физических факторов производственной среды на организм человека [48, 40]. Нормирование параметров микроклимата в условиях выполнения профессиональной деятельности на рабочем месте базируется на физиолого-гигиенических исследованиях в области изучения терморегуляторных механизмов организма человека, а также оценке сочетанного воздействия микроклиматических условий и уровня энерготрат работника [50]. Так, микроклиматические условия делятся на оптимальные и допустимые в зависимости от степени напряжения терморегуляторных механизмов.

Работа в условиях нагревающего микроклимата, или нагревающей среды, оказывает влияние на функциональное состояние организма работника вследствие высокого теплонакопления и уровня теплоотдачи испарением из-за нарушения структуры теплового баланса [40]. В целях поддержания оптимального уровня работоспособности и производительности труда необходим комплекс мер, включающий, в первую очередь, регламентацию режимов труда и отдыха на рабочем месте, основанную на изменении параметров функционального состояния организма работника. Для его гигиенического нормирования используется несколько параметров: температура, относительная влажность и скорость движения воздуха, тепловое излучение. При выполнении работ на открытой территории в теплое время года важная роль отводится значениям температуры воздуха и его относительной влажности, так как они определяют степень перегрева организма человека, выражающегося в изменении уравнении теплового баланса в сторону избыточных процессов теплопродукции. Контроль микроклиматических параметров обычно применяется для рабочих мест в помещениях. Однако большинство работ электротехнического персонала высоковольтного оборудования производится на открытых территориях (ОРУ, открытые трансформаторные площадки, ВЛ), где обеспечение комфортных условий путем организационно-технических мероприятий затруднено. Нормируемым

показателем нагревающей среды, по значению которого устанавливается класс условий труда работника при работе на открытой территории, является интегральный показатель – индекс тепловой нагрузки среды (ТНС-индекс), который отражает сочетанное влияние параметров микроклимата [40].

В качестве одного из информативных показателей в зарубежных стандартах, характеризующих уровень теплового воздействия на организм человека, в том числе и в производственных условиях, является индекс температуры влажного шара психрометра – WBGT (wet-bulb globe temperature) [14]. В РФ более распространен термин ТНС-индекс (индекс термической нагрузки среды), являющийся аналогичным индексу WBGT как по физическому смыслу, так и по методике определения [50]. Данный показатель является комплексным, объединяющим несколько микроклиматических параметров окружающей среды – температуру окружающего воздуха, температуру излучения (тепловое облучение), скорость движения воздуха, относительную влажность.

В настоящее время единственным нормативным документом, устанавливающим нормируемые величины показателей микроклимата на рабочем месте является СанПиН 1.2.3685-21 [48], в котором указаны лишь допустимые величины некоторых параметров (температура воздуха, его относительная влажность и скорость движения) при работе в помещении без регламентации режимов труда и отдыха работников.

Внешняя тепловая нагрузка определяется климатическими условиями окружающей среды. Выделение метаболического тепла организмом человека во время выполнения физической работы является внутренней составляющей тепловой нагрузки среды [14]. Соответственно, также для оценки воздействия тепловой нагрузки на организм человека используется уровень его выделения, который можно определить, как опытным путем, так и используя справочные (табличные) данные. Конечная оценка варьируется от низкого до очень высокого уровня выделения метаболического тепла.

Таким образом, внешняя тепловая нагрузка, оцениваемая по значению индекса WBGT, и внутренняя, оцениваемая по уровню выделения метаболического

тепла, представляют собой комплексную оценку влияния теплового воздействия на организм человека. В зависимости от полученных данных представляется возможным определить наиболее благоприятное соотношение времени работы и отдыха как для акклиматизированных, так и неакклиматизированных работников.

Регламентация режимов труда и отдыха. В настоящее время единственным способом снижения потенциально негативного воздействия нагревающей среды на организм работника в условиях выполнения работ на открытой территории, указанным в действующих в РФ нормативных документах, является регламентация продолжительности пребывания на рабочем месте [25]. Согласно МР 2.2.8.0017-10 режимы труда и отдыха работников регламентируется в зависимости от уровней энерготрат и ТНС-индекса. В превентивных целях были разработаны рекомендуемые величины ТНС-индекса в зависимости от категории выполняемой работы, которые в настоящее время недействительны [50]. Однако, представленные данные не учитывают потенциально негативного влияния использования СИЗ на тепловое состояние организма работника. В связи с чем в различных как отечественных, так и зарубежных нормативно-методических документах существуют поправочные коэффициенты. За рубежом также существуют подходы к регламентации труда и отдыха в зависимости от уровня энерготрат, климатических условий, используемых СИЗ, которые выражаются в поправочных коэффициентах для WBGT. В таблице 1.5.2 представлены способы регламентации режимов труда и отдыха работников в условиях нагревающей среды в России и за рубежом.

Например, в МР 2.2.8.0017-10 температура по отношению к уровню энерготрат должна снижаться на $0,3^{\circ}\text{C}$ на каждые 10% изоляции поверхности тела человека в связи с ограниченным влагообменом тела человека с окружающей средой. Основываясь на таком расчете, при условии эксплуатации СИЗ с низкими значениями влаго- и воздухопроницаемости с изоляцией поверхности тела человека до 80%, нормируемая величина ТНС-индекса снижается на $2,4^{\circ}\text{C}$ [25].

Таблица 1.5.2 – Способы регламентации режимов труда и отдыха работников в условиях нагревающей среды

Способ регламентации	Ограничения	Документ
По уровню энерготрат и величине ТНС-индекса на рабочем месте	- работник должен быть адаптирован к тепловой нагрузке - использование СИЗ из хлопчатобумажных материалов - работа в нагревающей среде выполняется в течение длительного времени	MP 2.2.8.0017-10 [25]
По поправочному коэффициенту к уровню ТНС-индекса на рабочем месте	- использование СИЗ, нарушающих влагообмен человека с окружающей средой	MP 2.2.8.0017-10 [25]
По расчету предельно допустимого времени непрерывного пребывания на рабочем месте	- работа в нагревающей среде выполняется эпизодически или непрерывно в течение не более одного месяца	MP 2.2.8.0017-10 [25]
По поправочному коэффициенту к нормативному уровню WBGT на рабочем месте	- работа в любом виде СИЗ	BS 7963:2000 [66]

При работе в СИЗ, затрудняющих тепловлагообмен человека с окружающей средой, увеличивается скорость обмена веществ, в связи с чем в Британском стандарте BS 7963:2000 установлены поправочные коэффициенты к уровню энерготрат в зависимости от характеристик используемых СИЗ [66]. Например, при уровне энерготрат, соответствующим 165 Вт/м^2 , и использовании комплекта СИЗ из влагонепроницаемых материалов (каска, куртка, брюки, перчатки, ботинки), общий уровень энерготрат будет выше на 75 Вт/м^2 (240 Вт/м^2). Также в стандарте представлены корректирующие величины к показателю WBGT по значению теплоизоляции эксплуатируемых работниками СИЗ.

При установлении предельных величин тепловой нагрузки на организм человека определен прогностический метод, основанный на комплексном

определении климатических параметров, скорости обмена веществ и значения теплоизоляции СИЗ [13].

Кроме того, предельно допустимое время непрерывного пребывания человека на рабочем месте может быть рассчитано по формуле, представленной в МР 2.2.8.0017-10, исходя из фактических значений климатических параметров на рабочем месте (температура воздуха, его относительная влажность, скорость ветра), типа СИЗ (в зависимости от значений его воздухопроницаемости) и процента изоляции поверхности тела человека элементами СИЗ [25].

Таким образом, существует несколько возможных способов регламентации режимов труда и отдыха работников в условиях нагревающей среды.

Профилактика. К основным профилактическим мероприятиям, направленным на предупреждение и снижение негативного воздействия производственных факторов, относятся технологические, технические, организационные мероприятия, выдача лечебно-профилактического питания и применение СИЗ [38]. В случае воздействия нагревающей среды на персонал при работах на открытой территории в теплое время года единственным подходящим вариантом мероприятий является проведение организационных мероприятий, которые направлены на снижение времени воздействия производственного фактора на человека. Иные виды мероприятий затруднительны или невозможны в силу специфики проведения производственных операций в условиях открытой местности.

Для оптимальной профилактики и коррекции нарушений водно-электролитного баланса организма работников необходимо потребление жидкости для компенсации потерь эссенциальных микроэлементов в связи с повышенным выделением пота в условиях нагревающей среды, объем жидкости не ограничен, однако её температура должна быть в диапазоне от 12 до 15°C [25].

В BS 7963:2000 описана роль СИЗ в возникновении и развитии теплового стресса у работников. Так, использование СИЗ влияет на все составляющие теплового баланса организма человека, необходимого для поддержания температурного гомеостаза в условиях воздействия климатических факторов,

путем увеличения уровня энерготрат из-за веса СИЗ и ограничений подвижности человека в результате их использования. Также на тепловой баланс оказывает влияние снижение эффективности механизмов теплоотдачи конвекцией и испарением из-за теплофизических характеристик СИЗ и площади поверхности тела человека, которое закрыто СИЗ. Снижение теплоотдачи организмом человека обратно пропорционально площади поверхности тела, закрытого СИЗ [66].

Согласно рекомендациям Международной организации труда (МОТ) по оценке воздействия вредных факторов на рабочем месте следует учитывать влияние СИЗ и уровень физической нагрузки на организм человека при работе в условиях высокой температуры и относительной влажности окружающей среды [57]. К рискам при работе в нагревающей среды относятся СИЗ, использование которых повышает вероятность возникновения теплового стресса.

Соответственно, на основании требований и рекомендаций отечественных и зарубежных документов необходимо проводить комплексные физиолого-гигиенические исследования с использованием современных методов и методик для оценки влияния нагревающей среды на функциональное состояние организма человека при использовании СИЗ.

Анализ литературных данных указывает на наличие вредного ведущего фактора на электросетевых объектах высокого и сверхвысокого напряжения. Как правило, уровни МП ПЧ редко превышают ПДУ для рабочей смены, в то время как превышение ПДУ ЭП ПЧ может составлять более, чем в 5 раз, что обуславливает использование электротехническим персоналом экранирующих комплектов типа Эп, защитный принцип которых построен на принципе клетки Фарадея. Использование электропроводящего материала и полного комплекта СИЗ, при их эксплуатации в тепловое время года на открытой территории вносит дополнительную термическую нагрузку на организм человека. Поэтому целесообразно рассматривать сочетанное влияние ведущего производственного фактора и тепловой нагрузки, возникающей при применении СИЗ.

ГЛАВА 2. ПОСТАНОВКА, ОБЪЕМ, МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ.

Общая схема выполняемых исследований представлена на рисунке 2.1, которая включает натурные и лабораторные исследования. В части натурных исследований были проведены гигиеническая оценка ЭП и МП ПЧ на ОРУ высокого и сверхвысокого напряжения на двух объектах электроэнергетики, гигиеническая оценка климатических параметров окружающей среды, исследования защитных свойств СИЗ в производственных условиях, а также оценка теплового состояния организма добровольцев в процессе проведения исследований.

Лабораторные исследования включали: исследование защитных свойств СИЗ, математическое моделирование в рамках планирования экспериментальных исследований на животных, а также экспериментальное изучение отдельных биологических эффектов ЭП ПЧ при применении экранирующих материалов СИЗ на лабораторных животных.

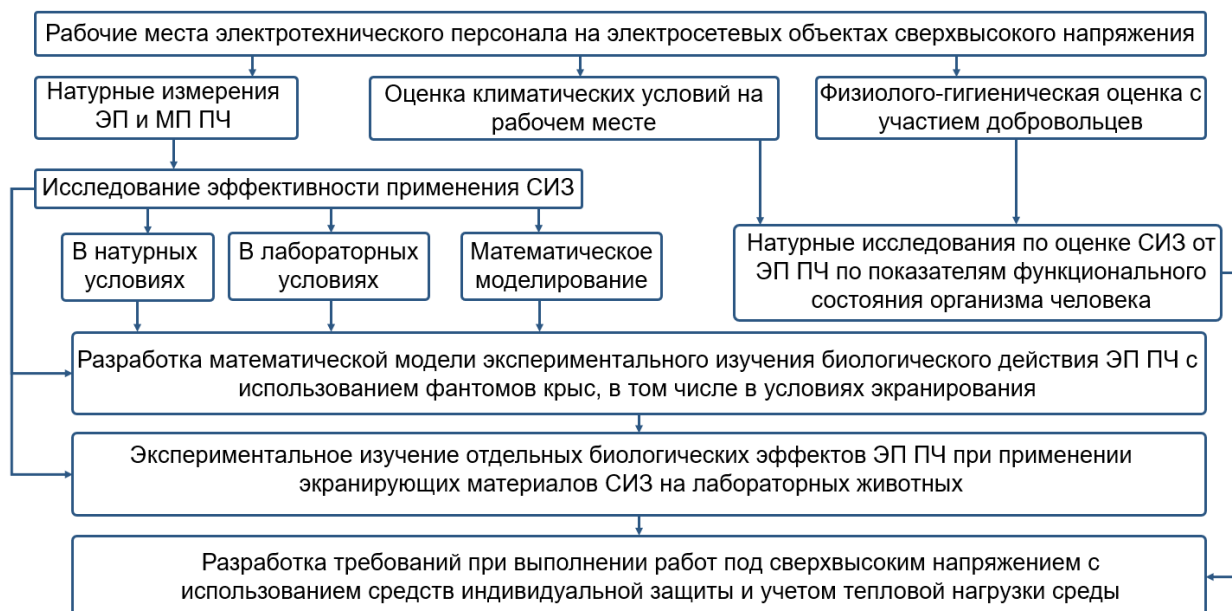


Рисунок 2.1 – Схема проведения исследований

2.1. Методы гигиенической оценки электрического и магнитного полей промышленной частоты на рабочих местах электротехнического персонала электросетевых объектов высокого и сверхвысокого напряжения

Гигиеническая оценка ЭП и МП ПЧ осуществлялась на наземных рабочих местах электротехнического персонала на ОРУ напряжением 220, 330, 500 и 750 кВ [7, 49], а также в зонах прохождения ВЛ напряжением 330, 500 и 750 кВ на двух объектах электроэнергетики. Полученные значения уровней магнитной индукции МП ПЧ пересчитывались на максимальный рабочий ток.

Измерения уровней напряженности ЭП и МП ПЧ выполнялись по МУК 4.3.2491-09 [27]. Расстояние от рабочих мест до токоведущих частей высоковольтного оборудования составляло не менее 3,5 и 5 м включительно на ОРУ напряжением до 500 кВ и 750 кВ соответственно [39, 49]. На ОРУ измерения уровней ЭП и МП ПЧ проводились в местах возможного пребывания персонала рядом с работающим оборудованием и под ошиновками, а также на местах съема показателей оборудования и на путях обхода. В каждой точке измерения уровней ЭП и МП 50 Гц осуществлялись на высоте 0,5 м, 1,5 м и 1,7 м от поверхности земли.

Для оценки напряженности ЭП ПЧ использовался измеритель напряжённости поля промышленной частоты 50 Гц ПЗ-50 (ЗАО «ТАНО», Россия) и портативный анализатор для измерения магнитных и электрических полей EFA-300 (Narda Safety Test Solutions GmbH, Германия) с использованием антенны E-FIELD. Оценка уровней индукции МП ПЧ проводилась с использованием портативного анализатора для измерения магнитных и электрических полей EFA-300 (Narda Safety Test Solutions GmbH, Германия) с использованием антенны B-FIELD.

2.2. Методы физиолого-гигиенического исследования теплового состояния добровольцев при эксплуатации средств индивидуальной защиты

Исследование функционального состояния организма человека (при участии 12 добровольцев) проводился в натурных (полевых) условиях на двух объектах электроэнергетики: объект 1 (Филиал «Костромская ГРЭС» АО «Интер РАО – Электрогенерация») – ОРУ напряжением 220 кВ и 500 кВ, а также объект 2 (подстанция 750 кВ «Металлургическая» филиала ПАО «ФСК ЕЭС» - Черноземное ПМЭС) – ОРУ напряжением 330 кВ, 500 кВ и 750 кВ.

Исследования были проведены в соответствии с Хельсинкской декларацией Всемирной медицинской ассоциации (выписка из протокола заседания Локального этического комитета ФГБНУ «НИИ МТ» №3 от 23.03.2022 г.) с подписанием всеми добровольцами информированного согласия об участии в исследовании.

Работы выполнялись на открытой территории в теплое время года (лето). Добровольцы выполняли физическую работу, включающую в себя обход и осмотр указанных электроустановок в соответствии с маршрутом перемещения электротехнического персонала на производственных объектах. На протяжении всего периода исследований добровольцы постоянно использовали СИЗ от ЭП ПЧ типа Эп-4(0), включающий в себя электропроводящие куртку, брюки, накаски, перчатки и ботинки.

Климатические условия во время проведения исследования, такие как температура воздуха ($T_{в}$, °C), его относительная влажность ($RH_{в}$, %), а также уровень ТНС-индекса (°C) регистрировались термогигрометром ИВТМ-7 К (АО «ЭКСИС», г. Москва).

Оценка теплового состояния добровольцев проводилась по интегральному показателю теплового состояния человека – изменению теплосодержания в организме (теплонакопление). Для его определения в соответствии с МУК 4.3.1895-04 [26] и ГОСТ Р ИСО 9886-2008 [15] с использованием беспроводных датчиков «Thermochron iButton™» («Maxim Integrated Products, Inc», США) проводилась регистрация значений температуры ($T_{к}$, °C) кожи по 5 точкам (лоб, грудь, кисть,

бедро и голень). Измерение температуры тела (T_t , °C) проводили цифровым медицинским термометром Thermoal Standard («PAUL HARTMANN», Германия). Общие теплоощущения (T_o , балл) доброволец оценивал в соответствии со шкалой [26]. Расчет значений средневзвешенной температуры кожи человека ($T_{свк}$, °C), средней температуры тела ($T_{ст}$, °C), теплосодержания ($Q_{тс}$, кДж/кг) и его изменения (теплонакопление) ($\Delta Q_{тс}$, кДж/кг) проводился на основании зарегистрированных значений показателей функционального состояния организма человека в соответствии с Методическими указаниями [26, 35].

2.3. Методы численного моделирования условий воздействия электрического и магнитного полей промышленной частоты

При математическом моделировании для предварительной оценки биологического действия ЭП ПЧ в условиях экранирования объектами исследования являлись численные модели (фантомы) самцов крыс Sprague Dawley (SPEAG AG, Швейцария) (рисунок 2.3.1) с длиной тела 185 мм (340 мм включая хвост), массой 198 г и состоявшие из 56 биологических тканей. Биологические ткани численных моделей крыс и физические характеристики тканей на частоте 50 Гц представлены в таблице 2.3.1 [142].

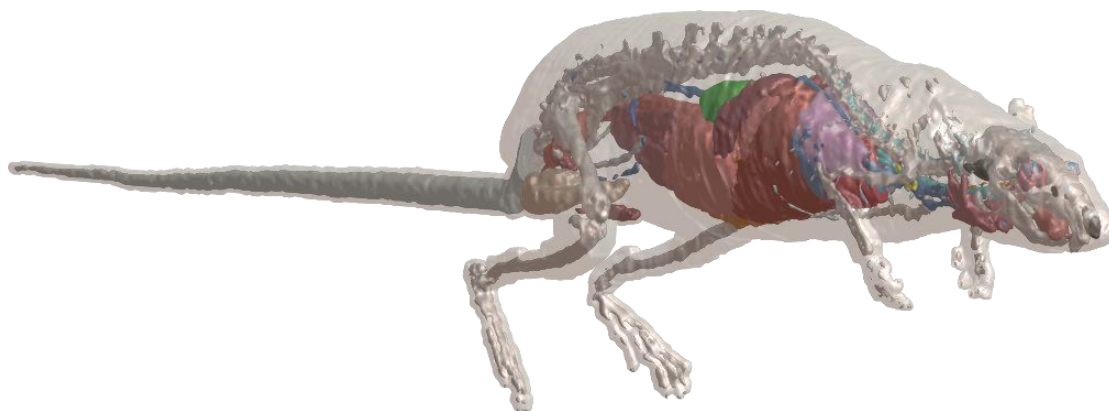


Рисунок 2.3.1 – Численная модель самца крысы [142]

Таблица 2.3.1 – Физические характеристики биологических тканей численных моделей самцов крыс [142]

Биологическая ткань	Диэлектрическая проницаемость, $\cdot 10^3$	Удельная электрическая проводимость, См/м	Плотность, кг/м³
Внутриглазная жидкость	0,109	2,0000	994
Гипофиз	1640	0,521	1053
Головной мозг (белое вещество)	5290	0,0533	1041
Головной мозг (серое вещество)	12100	0,0753	1045
Желудок	1640	0,521	1088
Жировая ткань	458	0,0404	911
Зубы	8,87	0,0201	2180
Кожа	1,14	0,0002	1109
Костный мозг (желтый)	167	0,00215	980
Костный мозг (красный)	170	0,101	1029
Кость	8,87	0,0201	1908
Кровеносные сосуды	8100	0,261	1102
Легкие	5760	0,0684	394
Межпозвоночные диски	0,0611	0,83	
Мозжечок	12100	0,0953	1045
Мочевой пузырь	482	0,205	1086
Мочеточник	8100	0,261	1102
Мышечная ткань	17700	0,233	1090
Нервная ткань	1610	0,0274	1075
Печень	1830	0,0367	1079
Пищевод	1640	0,521	1040
Поджелудочная железа	1640	0,521	1087
Почки	10100	0,0892	1066
Роговица	1640	0,4210	1062

Продолжение Таблицы 2.3.1

Биологическая ткань	Диэлектрическая проницаемость, ·103	Удельная электрическая проводимость, См/м	Плотность, кг/м3
Селезенка	10200	0,0857	1089
Семенники	1640	0,4210	1082
Сердце (миокард)	8660	0,0827	1081
Склера	293	0,5030	1032
Соединительная ткань	17100	0,2700	1027
Спинной мозг	1610	0,02740	1075
Спинномозговая жидкость	0,1090	2,0000	1007
Средний мозг	12100	0,0953	1046
Стекловидное тело	99	1,5000	1005
Сухожилия/связки	17100	0,2700	1142
Тимус	0,0688	0,6300	1023
Толстая кишка	32100	0,0545	1088
Тонкая кишка	2030	0,5220	1030
Трахея	88,70	0,3010	1080
Хрусталик	1,32	0,2000	1076
Хрящевая ткань	1640	0,1710	1100
Язык	1640	0,2710	1090

Математические модели условий экспозиции ЭП и МП ПЧ разрабатывались в среде трехмерного моделирования Sim4Life v9 (SPEAG AG, Швейцария). Расчет численных моделей осуществлялся методом конечных разностей в частотной области (finite-difference frequency-domain, сокр. FDFD [125]) с использованием высокопроизводительной вычислительной системы NVIDIA RTX 4070 Ti SUPER 16G (NVIDIA Corporation, США).

2.4. Методы исследований по оценке эффективности средств индивидуальной защиты от воздействия электрического поля промышленной частоты

Исследования защитных свойств комплектов проводились на образцах СИЗ типа Эп-1 (образец 1) в комплектации куртка-брюки, Эп-4(0) в комплектациях полукombineзон (образец 2) и комбинезон (образец 3) по отечественной (методика 1) и зарубежной (методика 2) методикам в натурных и лабораторных условиях [8, 35, 103].

Натурные исследования защитных свойств комплектов осуществлялись на ОРУ 750 кВ ПС Metallургическая Филиала ПАО «Россети» - МЭС Центра в местах наибольших зарегистрированных уровней ЭП ПЧ, а лабораторные исследования проводились с использованием высоковольтного испытательного стенда промышленной частоты ФГБНУ «НИИ МТ» [35].

Методика 1, как адаптированная методика, приведённая в ГОСТ 12.4.172-2019 [8], основывалась на величине напряженности ЭП ПЧ. Сначала измерялась напряженность фонового (без образца СИЗ) ЭП ПЧ, а затем величина напряженности ЭП ПЧ после ослабления СИЗ. Для измерения уровня фонового ЭП испытательный манекен размещался вертикально на уровне земли под токопроводящими элементами, измерительные датчики располагались внутри манекена в области головы и груди. Для измерения уровней ЭП ПЧ в области груди использовался портативный анализатор для измерения магнитных и электрических полей EFA-300 (Narda Safety Test Solutions GmbH, Германия) с использованием антенны E-FIELD, а в области головы – анализатор электромагнитных полей ENP-50 (Narda Safety Test Solutions GmbH, Германия) [35].

Для измерения уровня ослабленного ЭП на испытательный манекен надевался экранирующий комплект, измерительные датчики располагались внутри манекена в области головы и груди. Передача данных от измерительных антенн, размещенных в груди и голове манекена, на компьютер осуществлялась посредством оптоволоконного кабеля.

Расчет коэффициента экранирования индивидуального экранирующего комплекта в каждой области (голова, грудь) K_E (в дБ) осуществлялся по формуле (2.1):

$$K_E = 20 \lg \frac{E_0}{E}, \quad (2.1)$$

где E_0 – измеренное значение напряженности ЭП без экранирующего комплекта, выражаемое в кВ/м; E – измеренное значение напряженности ЭП, ослабленного экранирующим комплектом, выражаемое в кВ/м.

За итоговый коэффициент экранирования индивидуального экранирующего комплекта принималось значение, усредненное для области головы и груди.

Для оценки защитных свойств комплектов по величине стекаемого наведенного электрического тока была использована зарубежная методика (Методика №2) по IEC 60895-2020 [103]. Методика оценки защитных свойств экранирующих комплектов основана на измерении токов, проходящих через металлизированный манекен и надетый на него защитный комплект, который размещается в зоне воздействия ЭП. Испытания проводились в условиях, аналогичных испытаниям по первой методике. Для оценки величины стекающего электрического тока с манекена использовался мультиметр Appa 97 (Appa, Китай), а величины стекающего электрического тока с защитного комплекта – мультиметр Appa 107N (Appa, Китай). Один мультиметр подключался к ноге электропроводящего манекена, а второй к электропроводящему контактному выводу брючины комплекта. В таком случае коэффициент экранирования K_i (в дБ) рассчитывался по формуле (2.2):

$$K_i = 20 \lg \frac{I_1}{I_2} \quad (2.2)$$

где I_1 – результаты измерений электрического тока, проходящего через экранирующий комплект; I_2 – результаты измерений электрического тока, проходящего через металлизированный манекен.

2.5. Методы экспериментального исследования отдельных биологических эффектов воздействия электрического поля промышленной частоты на лабораторных животных

Экспериментальное исследование проводилось на лабораторных беспородных крысах самцах с общей численностью 36 особей и средней массой 200 ± 30 грамм на начало эксперимента. Экспериментальное исследование на животных проводилось при одобрении Локального этического комитета ФГБНУ «НИИ МТ» (Выписка из протокола №4 заседания Локального этического комитета ФГБНУ «НИИ МТ» от 17 апреля 2024 г.). Все манипуляции с животными и заборы биологических проб проводились согласно правилам асептики и антисептики, ФЗ №4979-1 от 14.05.1993, Правилам проведения работ с использованием экспериментальных животных, Конвенции Совета Европы о защите позвоночных животных, используемых для экспериментов или в иных научных целях (Страсбург, 1986 г.) и другим нормативным документам [10, 41].

Дизайн исследования представлен на рисунке 2.5.1. Животные содержались и подвергались воздействию ЭП ПЧ в диэлектрических контейнерах по 6 особей в каждом. В качестве подстила использовалась гигиеническая зооподстилка – опилки с добавлением сена. Корм подавался *ad libitum* в кормовую емкость в клетке. Корм ПК-120 соответствовал ГОСТ 34566-2019 [11], вода в стандартных поилках со стальными крышками-носиками подавалась *ad libitum* по ГОСТ Р 51232-98 [12]. Экспозиция ЭП ПЧ осуществлялась на высоковольтном испытательном стенде переменного тока промышленной частоты ФГБНУ «НИИ МТ» (рис. 2.5.2).



Рисунок 2.5.1 – Дизайн проведения экспериментальных исследований по изучению отдельных биологических эффектов воздействия ЭП ПЧ на лабораторных животных

В экспериментальном исследовании оценивались такие показатели функционального состояния животных, как общий анализ крови, лейкоцитарная формула, резистентная стойкость эритроцитов. Забор биологического материала для исследований проводился из хвостовой вены животных.

В конце эксперимента проводился забор костного мозга для проведения миелограммы (цитоморфологический состав костного мозга) методом декапитации.



Рисунок 2.5.2 – Общий вид экспозиции ЭП ПЧ

Цитоморфологический состав костного мозга животных анализировался путем подсчета миелограммы в мазке, окрашенном по Паппенгейму, с использованием микроскопа Levenhuk MED 10 (Levenhuk Inc., США) по методике Е.А. Кост [1, 18]. Приготовление мазков костного мозга осуществлялся из свежевзятого (нативного) материала из проксимального отдела бедренной кости.

Резистентная стойкость эритроцитов оценивалась по методу кислотных эритрограмм по Терскову–Гительзону на установке, включающей оптический блок фотоэлектрического колориметра ФЭК-56М со встроенным дифференциальным усилителем [2]. Для термостатирования суспензии эритроцитов применялся ультратермостат ТТУ-6 и термостатируемые кюветы. Регистрация кривых ослабления и расчет данных осуществлялся с использованием ПО «Программа для исследования резистентности эритроцитов» (Свидетельство № 2021662311 от 26.07.2021).

Общий анализ крови, взятой в пробирки с антикоагулянтом (ЭДТА-К3), проводили на автоматическом гематологическом анализаторе URIT-2900 Vet Plus (URIT Electronic Group Co., Ltd, Китай).

2.6. Объем исследований и методы статистической обработки данных

В результате гигиенической оценки уровней ЭП и МП ПЧ на наземных рабочих местах персонала ОРУ напряжением 220, 330, 500 кВ и 750 кВ объем исследований составил 12960 измерений ЭП ПЧ в 2160 точках. На территории ОРУ 220 кВ объекта 1 было проведено 4326 измерений в 721 точке, а на ОРУ 500 кВ - 3192 измерений в 532 точках. На втором объекте при исследовании ОРУ 330 кВ было проведено 3126 измерений в 521 точках, на ОРУ 500 кВ проведено 421 измерений в 71 точках, а на ОРУ 750 кВ было 1890 измерений в 315 точках.

По результатам физиолого-гигиенического исследования было получено 3835 показателей на объекте 1 и 3154 показателя на объекте 2.

В ходе математического моделирования были разработаны 2 математические (численные) модели, включая 1 модель испытательного высоковольтного стенда и 1 модель условий эксперимента на лабораторных животных. Общее количество показателей наведенного электрического тока составило 2448.

Общее количество данных по оценке экранирующих свойств СИЗ в натурных и лабораторных условиях составило 144 измерения.

Объем данных экспериментальных исследований отдельных биологических эффектов воздействия ЭП ПЧ на лабораторных животных составил более 6000 показателей.

Статистическая обработка данных осуществлялась в программном пакете RStudio 4.1.2. 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.

ГЛАВА 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ОБСУЖДЕНИЕ

3.1. Гигиеническая оценка электрического и магнитного полей промышленной частоты и физиолого-гигиеническая оценка теплового состояния добровольцев при использовании средств индивидуальной защиты на рабочих местах электротехнического персонала

В целях гигиенической оценки условий труда электротехнического персонала были выполнены измерения уровней ЭП и МП ПЧ на рабочих местах на территории 5 ОРУ двух объектов электроэнергетики: ПС 750 кВ Металлургическая филиала ПАО «ФСК ЕЭС» – Черноземное ПМЭС на ОРУ 330 кВ, 500 кВ и 750 кВ и филиала «Костромская ГРЭС» на ОРУ 220 кВ и 500 кВ.

На ОРУ 220 кВ на было проведено 4056 измерений уровней ЭП и МП ПЧ в 760 точках. В исследуемых точках значения напряженности ЭП ПЧ изменялись в диапазоне от 0,20 до 17,80 кВ/м, а значения МП достигали 40,23 мкТл. Карта распределения уровней ЭП ПЧ представлена на рисунке 3.1.1 а уровней МП ПЧ – на рисунке 3.1.2.

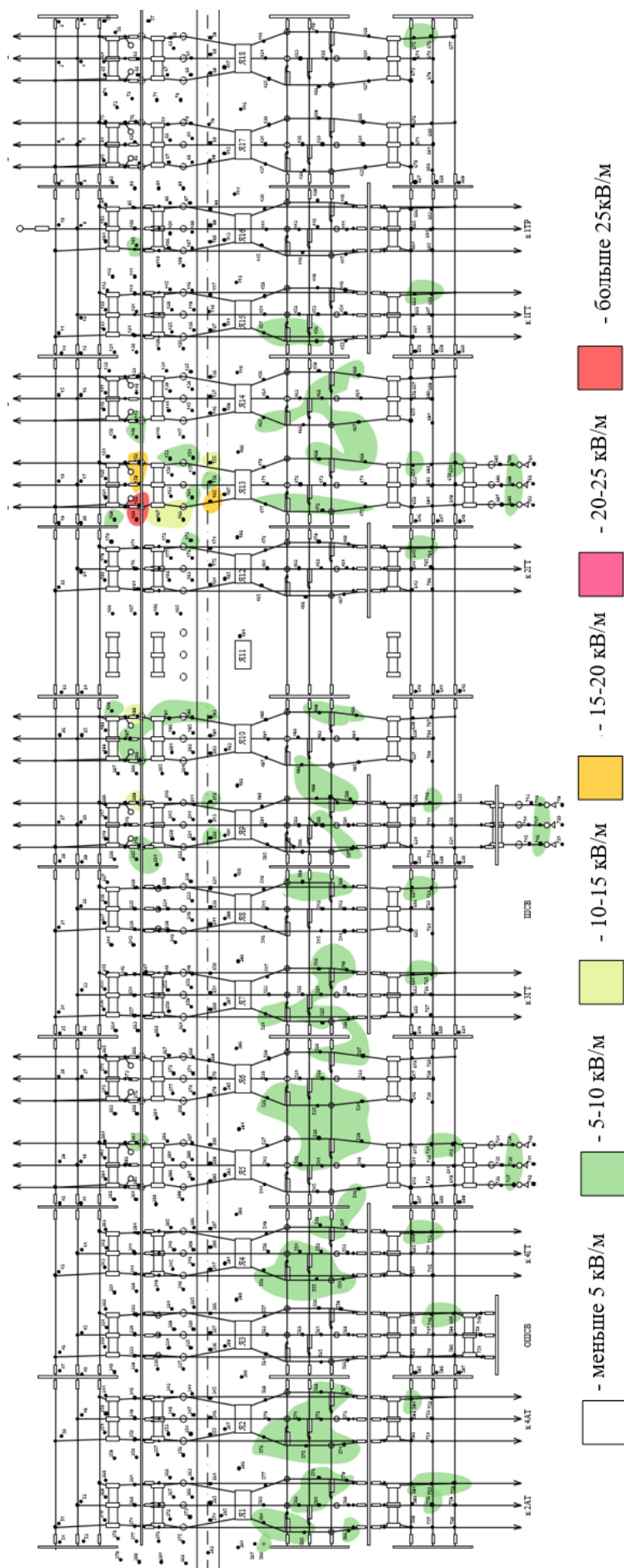


Рисунок 3.1.1 — Уровни ЭП ПЧ на ОРУ 220 кВ

Рисунок 3.1.2 – Уровни МП ПЧ на ОРУ 220 кВ

Максимальный зафиксированный уровень ЭП ПЧ (17,80 кВ/м), а также наибольшие уровни напряженности ЭП ПЧ (в диапазоне 15-17 кВ/м) были зафиксированы в 13 ячейке в пяти точках вблизи разъединителей и в месте обхода персонала.

Напряженность ЭП ПЧ от 10 до 15 кВ/м была отмечена в ячейке 9 (под фазой С), ячейке 10 (под фазой С) и вблизи ячейки 13 (под фазой А и на пути обхода персонала).

Измеренная напряженность ЭП ПЧ от 5 до 10 кВ/м отмечалась в ячейках №1-10, 12-16 и 18 в 112 точках под фазами А, В и С, а также на пути обхода персонала. В остальных местах измерений на ОРУ 220 кВ превышений ПДУ напряженности ЭП ПЧ для всей рабочей смены не было зафиксировано.

На территории ОРУ 220 кВ уровни напряжённости ЭП ПЧ, превышающие предельно допустимые, наблюдались в 124 точках (17% от всей территории) (рисунок 3.1.3)

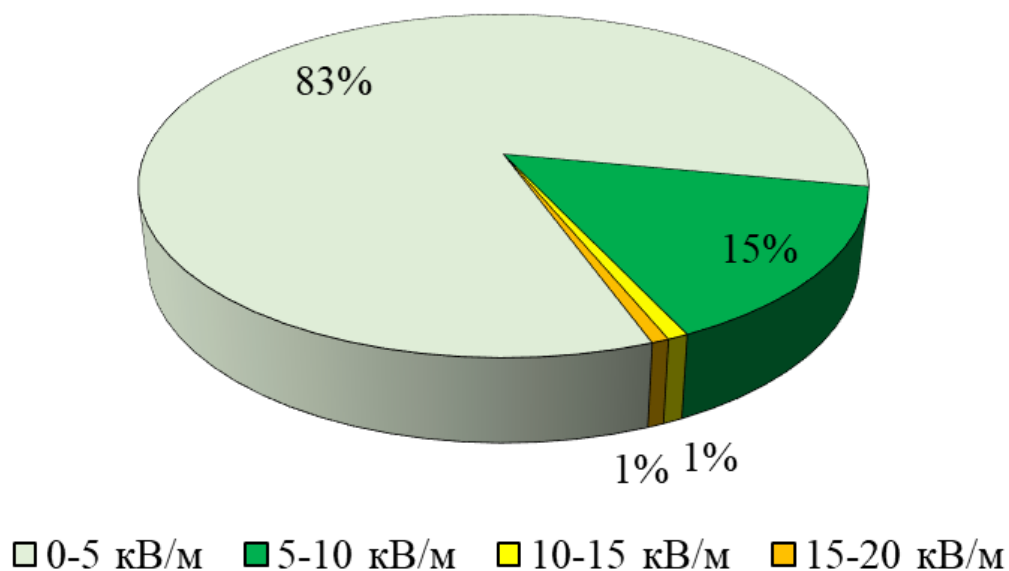


Рисунок 3.1.3 – Процентное распределение уровней ЭП ПЧ на территории ОРУ 220 кВ

Наибольшие уровни магнитной индукции, рассчитанные для наихудшего случая воздействия при нагрузке, приравненной к номинальной, составляли от 102,45 до 125,74 мкТл и отмечались на высоте 1,7 м от земли в

ячейке 15 в 6 точках на пересечении фаз А, В и С с соединительной шиной №2. Во всех остальных местах измерений на ОРУ уровни магнитной индукции не превышали 100 мкТл.

На ОРУ 330 кВ были проведены измерения уровней ЭП и МП в объеме 2970 измерений в 495 точках. Рассматривались зоны возможного пребывания и передвижения персонала при выполнении работ на уровне земли. При выполнении измерений расстояние от человека и измерительного прибора до токоведущих частей оборудования составляло не менее 2,5 м. Карта распределения уровней ЭП ПЧ представлена на рисунке 3.1.4.

Наибольший уровень напряженности ЭП ПЧ, составивший 14,4 кВ/м, был зафиксирован вблизи распределительного трансформатора и автотрансформатора. Значений напряженности ЭП ПЧ выше 15 кВ/м на ОРУ 330 кВ зафиксировано не было.



Напряженность ЭП ПЧ до 14,3 кВ/м отмечалась вблизи сборной шины. Уровни напряженности ЭП ПЧ в диапазоне от 12 до 13 кВ/м были зафиксированы на уровне 1,7 м под крайней фазой распределительного трансформатора, вблизи сборной шины, а также у крайней фазы разъединителя трансформатора напряжения.

Уровни напряженности ЭП ПЧ варьировались достигали 10,9 кВ/м вблизи сборной шины рядом с распределительным трансформатором. Схожие уровни ЭП ПЧ отмечались вблизи двух разъединителей (11,7 кВ/м), выключателей (11,4 кВ/м), а также над кабельными каналами (11,8 кВ/м). У крайних фаз разъединителя трансформатора напряжения, а также распределительного трансформатора уровни напряженности ЭП ПЧ варьировались от 9,9 до 11,8 кВ/м.

Во всех остальных местах измерения зафиксирован уровень напряженности ЭП ПЧ от 5 до 10 кВ/м, за исключением точек, расположенных вблизи дорожек обхода персонала в ячейке 5, разъединителей и выключателей в ячейках 4, 5 и 8, а также пары линейных распределителей и трансформаторов напряжения ВЛ 330 кВ, идущих к потребителям электроэнергии за пределы ОРУ.

На территории ОРУ 330 кВ процент превышения ПДУ был намного выше и составлял 80% от всей территории в 391 точке (рисунок 3.1.5).

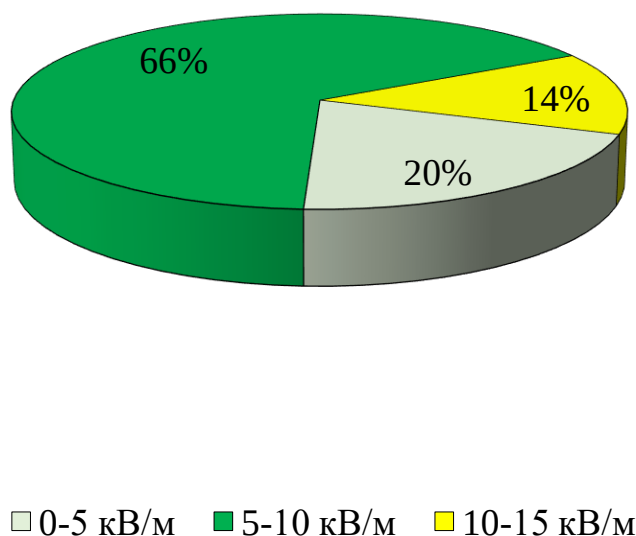


Рисунок 3.1.5 – Процентное распределение уровней ЭП ПЧ на территории ОРУ 330 кВ

Наибольший уровень магнитной индукции, рассчитанный для наихудшего случая воздействия при нагрузке, приравненной к номинальной, составил 54,15 мкТл у сборной шины II. В целом ни на одном из возможных мест пребывания персонала при выполнении работ на уровне земли не отмечено превышения ПДУ МП ПЧ для всей рабочей смены.

Измерения уровней ЭП и МП ПЧ на ОРУ 500 кВ (объект 1) были проведены в объеме 3540 измерений в 590 точках. При выполнении измерений расстояние от человека и измерительного прибора до токоведущих частей оборудования составляло не менее 3,5 м. Полученные значения уровней напряженности ЭП и МП ПЧ представлены в виде контурных карт на рис. 3.1.6 и 3.1.7 соответственно.

Максимальный уровень напряженности ЭП ПЧ 19,40 кВ/м был зафиксирован у линейного разъединителя и трансформатора тока ЛЭП 500 кВ, вблизи которых проходят пути обхода персонала. Уровень ЭП ПЧ 19,20 кВ/м отмечался вблизи трансформатора напряжения рядом с путем обхода персонала. Уровень ЭП ПЧ 15,40 кВ/м был отмечен близи заземляющего ножа сборной шины III.

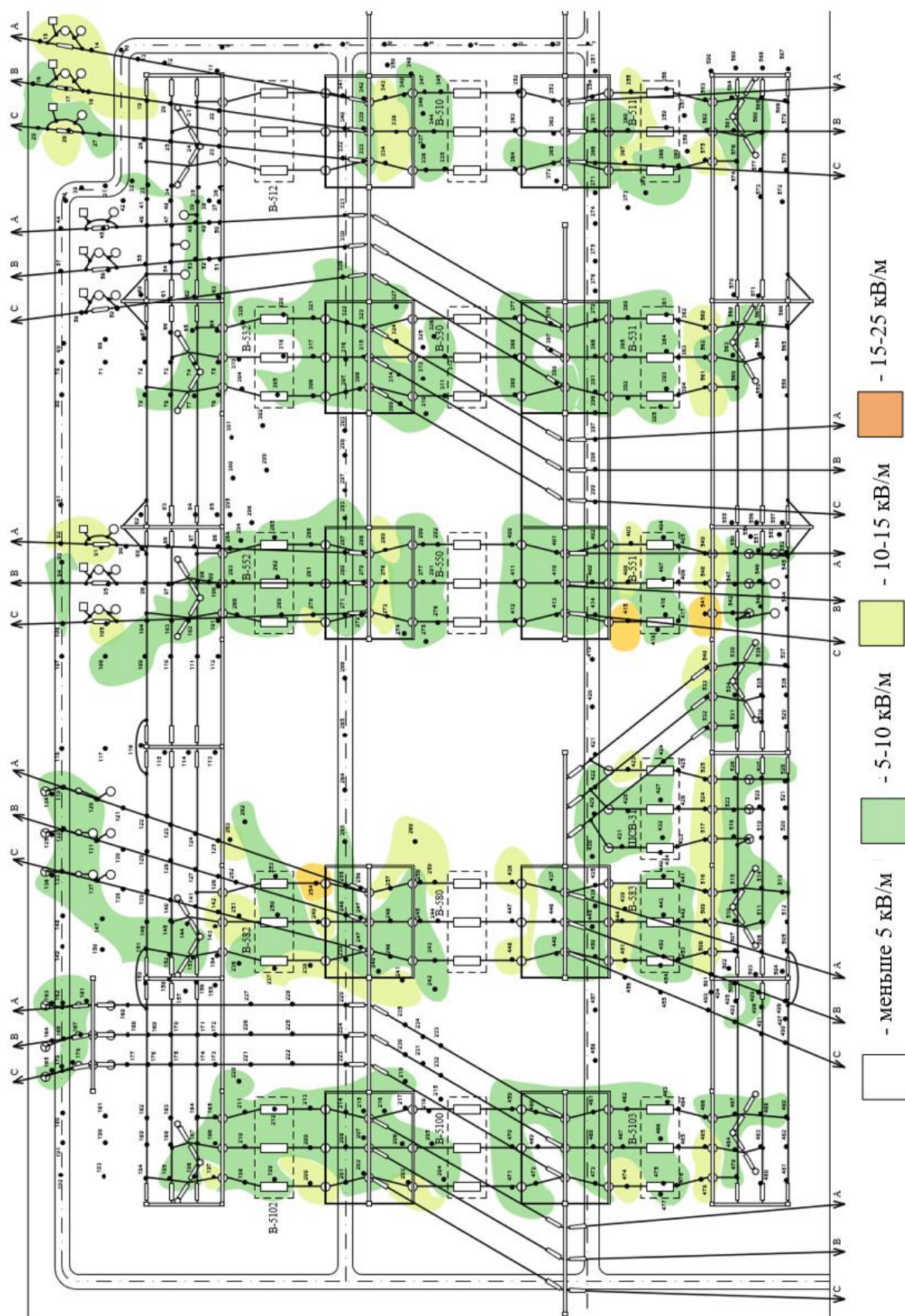


Рисунок 3.1.6 – Уровни ЭП ПЧ на ОРУ 500 кВ (объект 1)

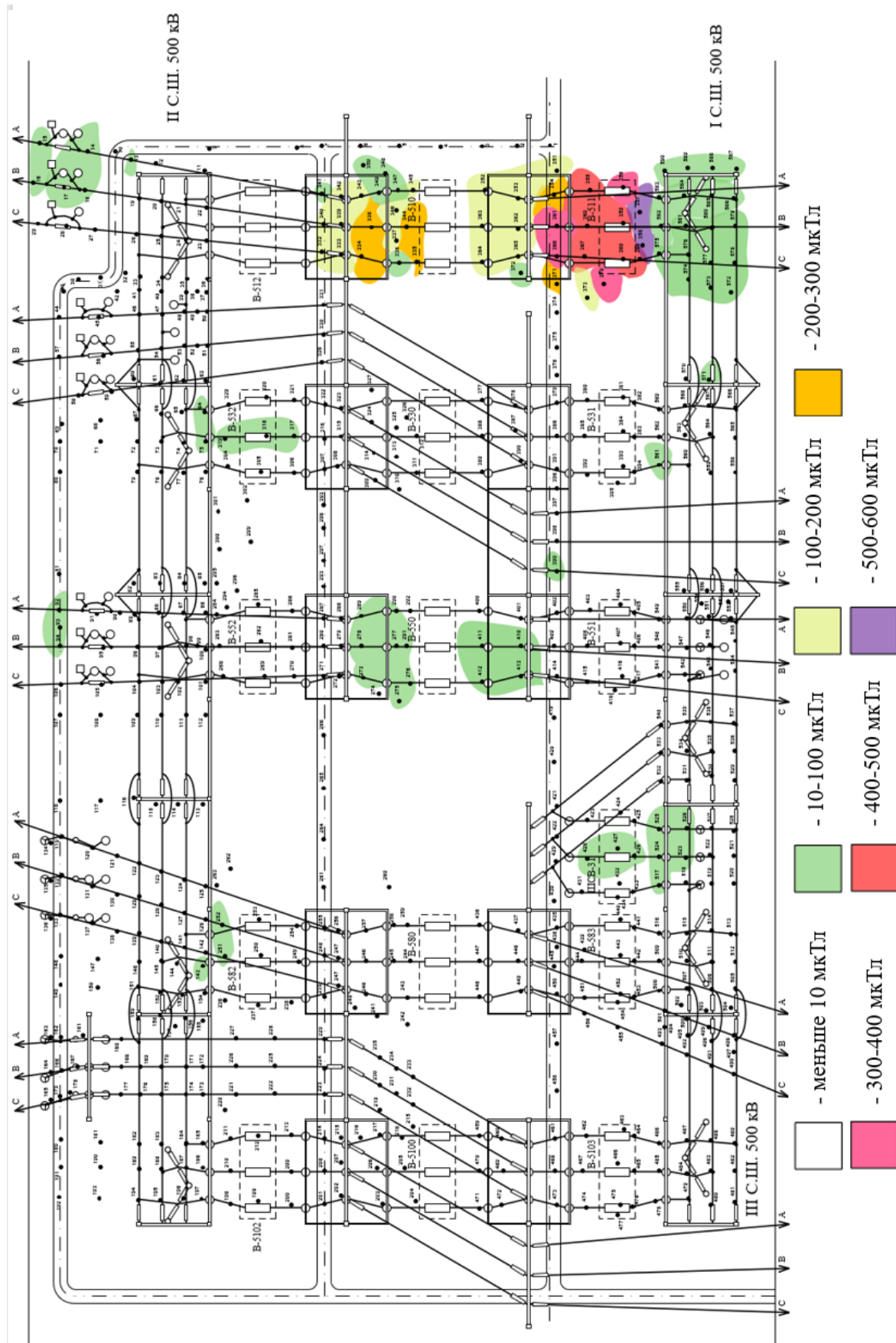


Рисунок 3.1.7 – Уровни МП ПЧ на ОРУ 500 кВ (объект 1)

Под крайней фазой сборной шины III уровня напряженности ЭП ПЧ почти на всей её протяженности варьировались от 10,60 до 12,80 кВ/м. Под крайними фазами А и С выхода ВЛ Нижегородская вблизи сборной шины II уровня напряженности ЭП ПЧ также варьировались от 10,10 до 11,5 кВ/м. Схожие уровни ЭП ПЧ (10 – 13,5 кВ/м) отмечались под фазами А, В и С выходов ВЛ Костромская АЭС и Владимирская.

Вблизи трансформаторов напряжения, трансформаторов тока, линейных разделителей, разъединителей трансформатора напряжения, заземляющих ножей, на путях обхода персонала, выходах ВЛ Луч и Нижегородская уровни напряженности ЭП ПЧ не превышали 10 кВ/м.

Наибольшие уровни магнитной индукции, рассчитанные для наихудшего случая воздействия при нагрузке, приравненной к номинальной, составили 579,32 и 536,69 мкТл и были зафиксированы вблизи сборной шины и шины разделителя.

Магнитная индукция вблизи шины разделителя и заземляющего ножа варьировалась от 421,38 до 499,31 мкТл. Магнитная индукция от 318,43 до 340,04 мкТл также была зафиксирована поодаль от данного оборудования, а также на пути обхода персонала.

В точках на пути обхода персонала и трансформатора 500 кВ отмечались уровни магнитной индукции от 203,12 до 276 мкТл. Поодаль от трансформатора 500 кВ, а также на путях обхода персонала вблизи сборной шины II уровня магнитной индукции варьировались от 100 до 200 мкТл. В остальных точках уровни магнитной индукции не превышали 100 мкТл.

Измерения уровней ЭП и МП ПЧ на ОРУ 500 кВ (объект 2) были проведены в объеме 324 измерения в 54 точках. Превышений ПДУ индукции МП на всей территории ОРУ отмечено не было. Значения уровней напряженности ЭП ПЧ представлены в виде контурной карты на рис. 3.1.8.

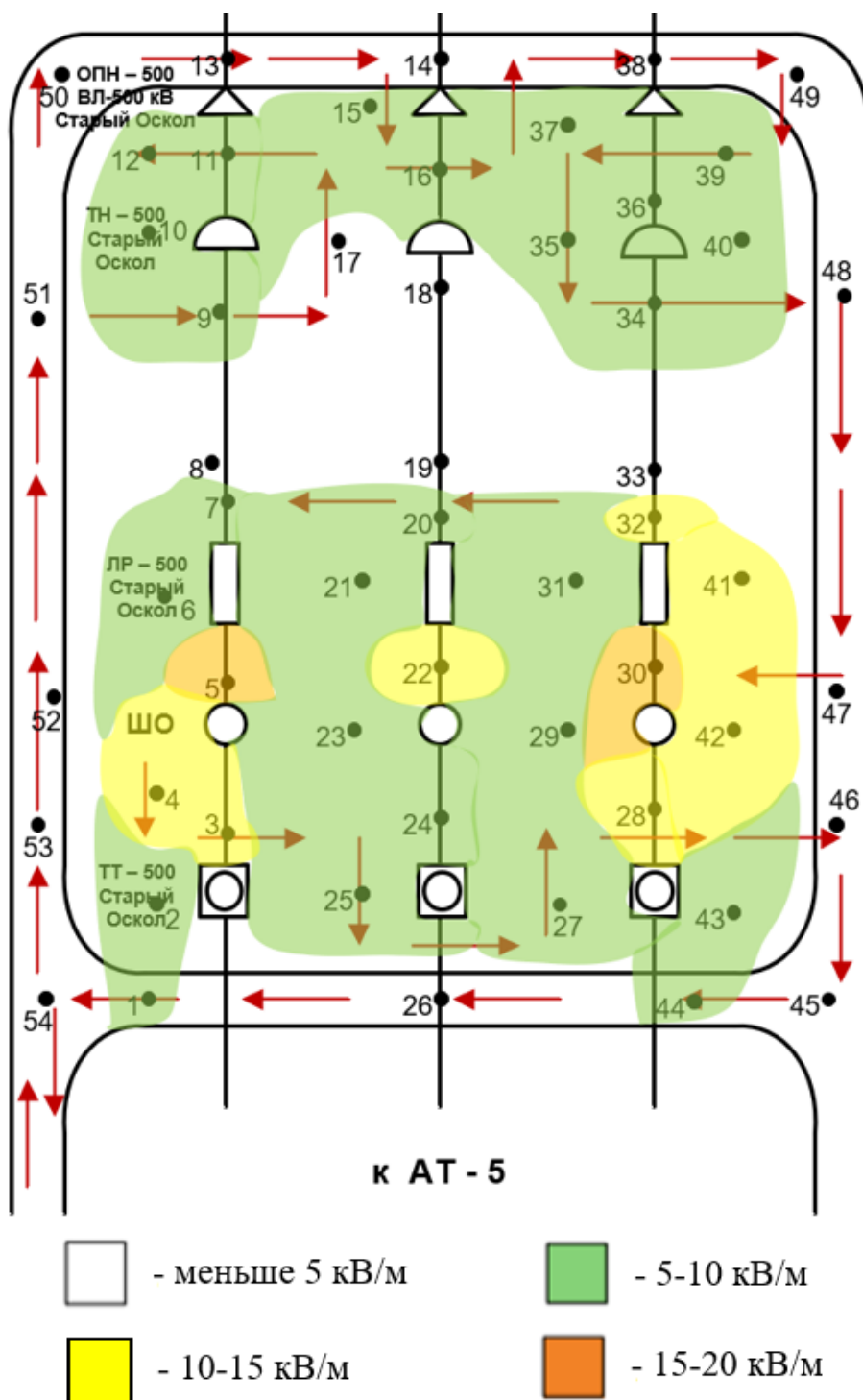


Рисунок 3.1.8 – Уровни напряженности ЭП ПЧ на ОРУ 500 кВ (объект 2)

Максимальные уровни напряженности ЭП ПЧ 18,7 и 16,1 кВ/м были отмечены под провисами крайних фаз между шкафом оперативного обслуживания и линейным разъединителем. Уровни напряженности ЭП ПЧ в диапазоне от 10 до 13,8 кВ/м были выявлены на пути обхода персонала под провисами крайних фаз между трансформатором тока и шкафом оперативного

обслуживания (13,2 и 11,6 кВ/м), между шкафом оперативного обслуживания и дорожками (13,7 и 12,7 кВ/м), под провисом средней фазы между шкафом оперативного обслуживания и линейным разъединителем (13,8 кВ/м), а также вблизи крайней фазы линейного разъединителя (10 и 10,4 кВ/м).

Во всех остальных местах измерения зафиксирована напряженность ЭП ПЧ от 5 до 10 кВ/м, за исключением точек вблизи средней фазы трансформатора напряжения, между трансформатором напряжения и линейным разъединителем и дорожках по периметру ОРУ, где уровни напряженности ЭП ПЧ не превышали предельно допустимые.

На двух ОРУ 500 кВ процент превышения ПДУ отмечался на 57% всей территории в 366 точках (рисунок 3.1.9).

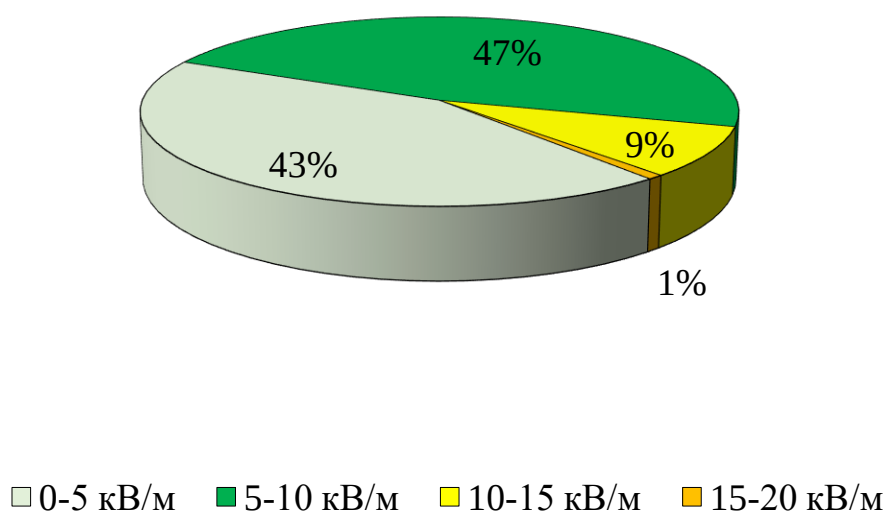


Рисунок 3.1.9 – Процентное распределение уровней ЭП ПЧ на территории ОРУ 500 кВ

На ОРУ 750 кВ были проведены измерения уровней ЭП и МП в объеме 1944 измерения в 324 точках. Превышений ПДУ индукции МП на всей территории ОРУ 750 кВ отмечено не было. Значения уровней напряженности ЭП ПЧ представлены в виде контурной карты на рис. 3.1.10.

Наибольший уровень напряженности ЭП ПЧ, составивший 30,8 кВ/м, был зафиксирован вблизи сборной шины II и разъединителя 2. Уровни напряженности ЭП ПЧ, превышающие 25 кВ/м, были зафиксированы вблизи сборной шины I около разъединителя 1 (26,3 - 28,7 кВ/м) и сборной шины II между разъединителем трансформатора напряжения и разъединителем 2 (26,2 кВ/м).

Напряженность ЭП ПЧ от 20 до 25 кВ/м была отмечена вблизи сборной шины II около разъединителя трансформатора напряжения (23,4 кВ/м), на дорожке между выключателем и трансформатором тока (20 кВ/м), вблизи разъединителя 2 (20 кВ/м), вблизи сборной шины I между разъединителем 1 и разъединителем трансформатора напряжения (22,2 – 23,8 кВ/м).

Измеренная напряженность ЭП ПЧ от 15 до 20 кВ/м отмечалась вблизи сборной шины II на путях обхода персонала около разъединителя 2 (15,5 – 17,6 кВ/м), около разъединителя трансформатора напряжения сборной шины II (15,5 – 18 кВ/м), около распределительного трансформатора АТ-3 (15 – 15,1 кВ/м); около линейного разъединителя (15,3 кВ/м), на путях обхода персонала около разъединителя 2 (15 – 17,8 кВ/м), а также вблизи разъединителя трансформатора напряжения сборной шины I (15,4 – 19,4 кВ/м).

Уровни напряженности ЭП ПЧ от 10 до 15 кВ/м были зафиксированы: на путях обхода персонала рядом с ограничителем перенапряжений; рядом с трансформатором напряжения сборной шины II, а также на всем протяжении сборной шины II вблизи различного электрооборудования; на дорожке вблизи выключателя 2 и 4; над кабельным каналом; вблизи трансформатора тока; на дорожке между трансформатором тока и выключателем 2; вблизи выключателя 4 со стороны кабельного канала; а также на всем протяжении

сборной шины I вблизи различного электрооборудования; над кабельным каналом и вблизи путей обхода персонала.

Уровни напряженности ЭП ПЧ от 5 до 10 кВ/м отмечались: под средней фазой вблизи трансформатора напряжения соединительной шины II; вблизи разъединителей и выключателей около путей обхода персонала; на дорожках и над кабельным каналом; на дорожках около трансформатора тока ТТ-750; вблизи ограничителя перенапряжений около автотрансформатора 5; в точках вокруг трансформатора напряжения соединительной шины I; вблизи линейного разъединителя, а также в точках вблизи автотрансформаторов 3 и 4.

На ОРУ 750 кВ процент превышения ПДУ отмечался на 72% всей территории в 233 точках (рисунок 3.1.11). Также стоит отметить, что на ОРУ 750 кВ отмечались уровни напряженности ЭП ПЧ, превышающие максимальное ПДУ (25 кВ/м), при котором не допускается проведение работ без использования СИЗ.

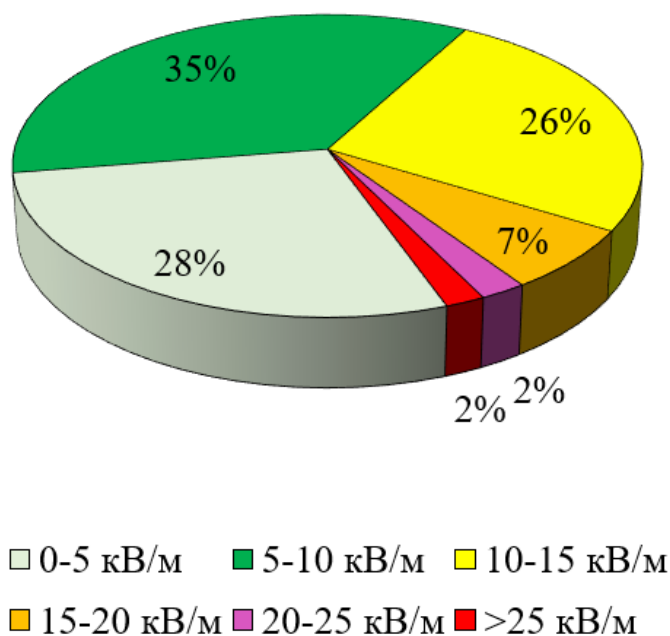


Рисунок 3.1.11 – Процентное распределение уровней ЭП ПЧ на территории ОРУ 750 кВ

Результаты проведенной гигиенической оценки показали превышение ПДУ ЭП ПЧ за всю рабочую смену (5 кВ/м) на каждом из исследуемых ОРУ.

Полученные результаты гигиенической оценки условий труда электротехнического персонала на ОРУ напряжением 220, 330, 500 и 750 кВ свидетельствуют о том, что для обеспечения работ без ограничения по времени, а также согласно правилам по охране труда при эксплуатации электроустановок [39], электротехнический персонал обязан использовать СИЗ от ЭП ПЧ типа Эп-1 (Эп-3) или Эп-4(0).

3.2. Физиолого-гигиеническая оценка теплового состояния добровольцев при использовании средств индивидуальной защиты на рабочих местах электротехнического персонала

Исходя из того, что выполнение профессиональной деятельности электротехнического персонала на открытой территории проводится, как правило, в летний/теплый период года, а также использование СИЗ для производства работ на объектах сверхвысокого напряжения является обязательным. Параллельно с измерением уровней напряженности ЭП и МП ПЧ проводилось измерение климатических параметров окружающей среды, а также исследование по оценке теплового состояния добровольцев, использующих СИЗ от ЭП ПЧ типа Эп-4(0).

В исследованиях на всех объектах участвовало 12 добровольцев в возрасте 35 ± 13 лет, весом $74,28 \pm 24,11$ кг, ростом $1,74 \pm 0,10$ м и индексом массы тела (ИМТ) $24,32 \pm 6,62$ кг/м².

Добровольцы выполняли физическую работу, соответствующую категории работ Па с общими энерготратами 113 Вт/м², включающую в себя обход территории ОРУ напряжением 220, 330, 500 и 750 кВ.

На протяжении всего периода исследований добровольцы постоянно использовали СИЗ от ЭП ПЧ, включающие в себя электропроводящую одежду (куртку и брюки), наkasник, перчатки и ботинки. Непосредственно под СИЗ

добровольцы надевали комплект хлопчатобумажного белья (футболка, шорты и носки), а под накатник – пластиковую каску. В таблице 3.1.1 и 3.1.2 представлены климатические параметры окружающей среды, измеренные в процессе выполнения работы на двух объектах электроэнергетики.

Таблица 3.1.1. Значения климатических параметров за период наблюдений на объекте 1

Показатель	День	Фон	Работа, мин		Отдых, мин	Усредненное значение
			30	60	30	
Температура окружающей среды (Тв), °С	1	23,2	23,9	24,7	23,6	23,8±1,0
	2	22,9	23,0	23,2	24,7	
	3	22,6	23,9	24,3	25,7	
	4	22,4	23,5	24,2	25,3	
Относительная влажность воздуха (RHв), %	1	47,7	45,9	45,5	50,4	39,3±7,3
	2	49,2	42,5	27,1	27,7	
	3	34,8	32,3	36,9	37,6	
	4	44,2	36,1	35,5	35,7	
ТНС-индекс, °С	1	17,0	19,4	20,4	18,4	17,9±1,7
	2	16,1	19,2	19,8	18,5	
	3	16,2	16,8	17,0	17,2	
	4	15,6	16,7	16,7	20,9	

Таблица 3.1.2. Значения климатических параметров за период наблюдений на объекте 2

Показатель	День	Фон	Работа, мин		Отдых, мин	Усредненное значение
			30	60	30	
Температура окружающей среды (Тв), °С	1	32,4	35,4	34,9	34,5	32,6±2,0
	2	30,4	34,1	35,3	34,5	
	3	29,6	30,8	33,2	29,9	
	4	32,3	33,8	33,2	30,7	
	5	32,5	35,3	32,2	30,8	
	6	31,7	35,2	34,1	31,8	
	7	27,7	32,5	32,9	32,4	
Относительной влажности воздуха (RHв), %	1	39,2	40,3	40,4	40,7	39,3±2,8
	2	37,8	37,2	35,4	36,2	
	3	37,8	38,8	33,2	37,1	
	4	43,0	38,0	44,5	45,8	
	5	36,8	38,0	37,5	39,7	
	6	36,8	39,7	40,2	39,6	
	7	43,5	42,9	40,7	40,5	
ТНС-индекс, °С	1	23,8	25,7	25,6	29,4	26,6±1,3
	2	24,8	25,1	27,5	28,5	
	3	25,4	26,0	28,2	28,4	
	4	26,2	27,0	27,2	27,5	
	5	25,4	27,7	25,8	25,4	
	6	26,9	27,7	27,2	27,1	
	7	24,9	26,4	26,6	26,4	

Приведенные в таблице 3.1.2 показатели климатических параметров окружающей среды указывают на то, что на объекте 1 средние значения температуры воздуха, его относительной влажности и ТНС-индекса находились в пределах допустимых величин [48]. Однако, на объекте 2 (таблица 3.1.1) наблюдалась совершенно иная ситуация: применительно к категории выполнения работ Па средние значения температуры воздуха (32,6°С) за период исследований превышали в среднем на 5,6°С верхнюю границу допустимых значений (27°С) для теплого периода года [48], а

значения ТНС-индекса, составляющие в среднем $26,6^{\circ}\text{C}$, на $1,5^{\circ}\text{C}$ превышали допустимые величины ($25,1^{\circ}\text{C}$) [40].

Продолжительность исследования на каждом из объектов составляла 90 минут: 60 минут выполнения физической работы и 30 минут отдыха.

Показатели функционального состояния организма человека регистрировались до начала работы (исходные значения показателей), во время выполнения рабочих операций в течение 60-ти минут и в течение 30-ти минутного периода восстановления.

На рисунках 3.1.12 – 3.1.14 представлена динамика усредненных значений средневзвешенной температуры кожи, температуры пододежного пространства и влажности пододежного пространства добровольцев за весь период исследования на объекте 1.

Согласно данным, представленным на рисунке 3.1.12, при проведении работ на объекте с допустимыми климатическими параметрами в течение 30-ти минут рабочего периода наблюдался рост усредненных значений средневзвешенной температуры кожи, после которого имело место снижение значений этого показателя, связанное, вероятно, с началом активной фазы потоотделения, что подтверждается также снижением температуры воздуха в пододежном пространстве (рисунок 3.1.13) и увеличением значений $RH_{п/о}$ (рисунок 3.1.14).

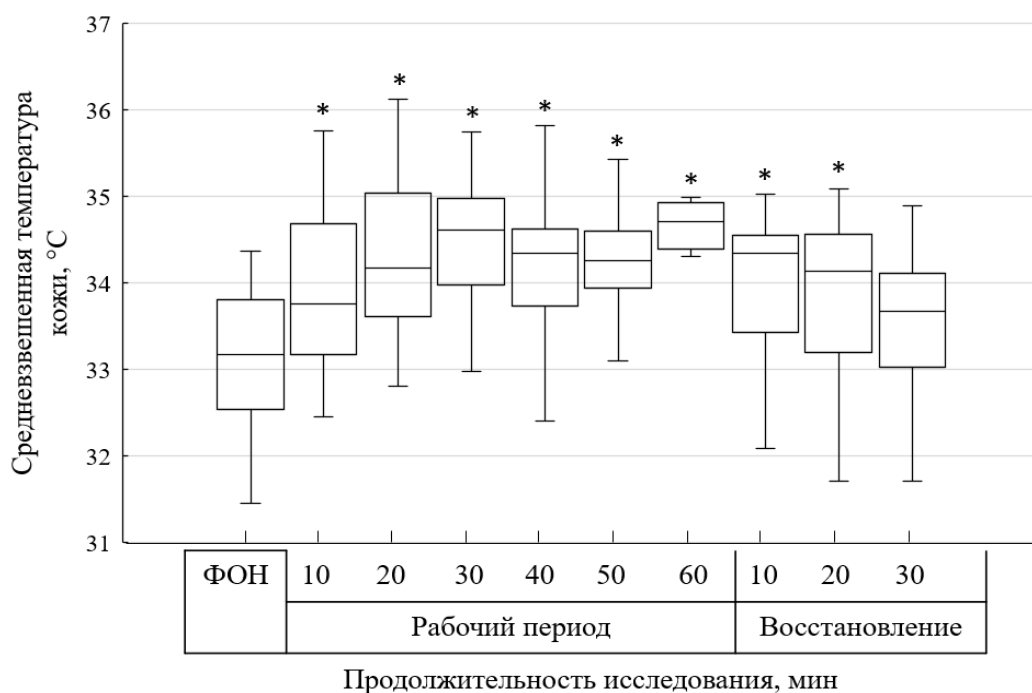


Рисунок 3.1.12 – Динамика усредненных значений средневзвешенной температуры кожи добровольцев за весь период исследования (объект 1), $n=6$, Ме [25; 75] (* – $p<0,05$ по сравнению с фоновыми значениями)

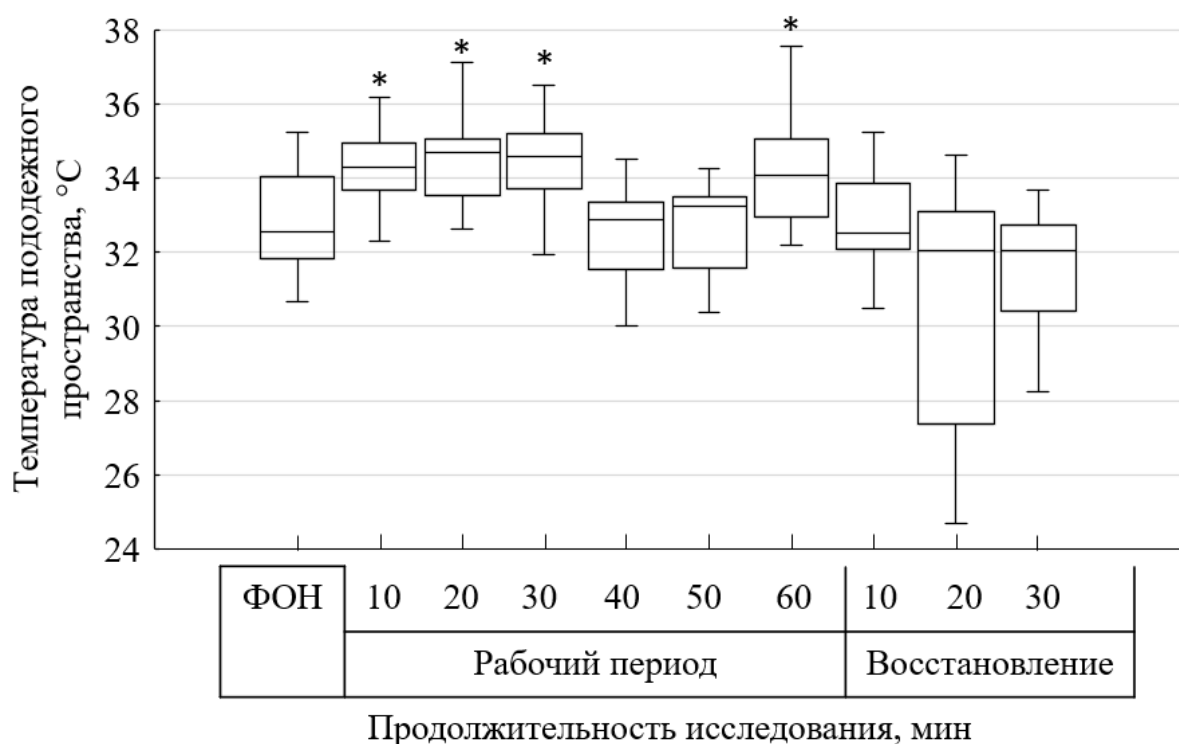


Рисунок 3.1.13 – Динамика усредненных значений температуры подкожного пространства за весь период исследования (объект 1), $n=6$, Ме [25; 75] (* – $p<0,05$ по сравнению с фоновыми значениями)

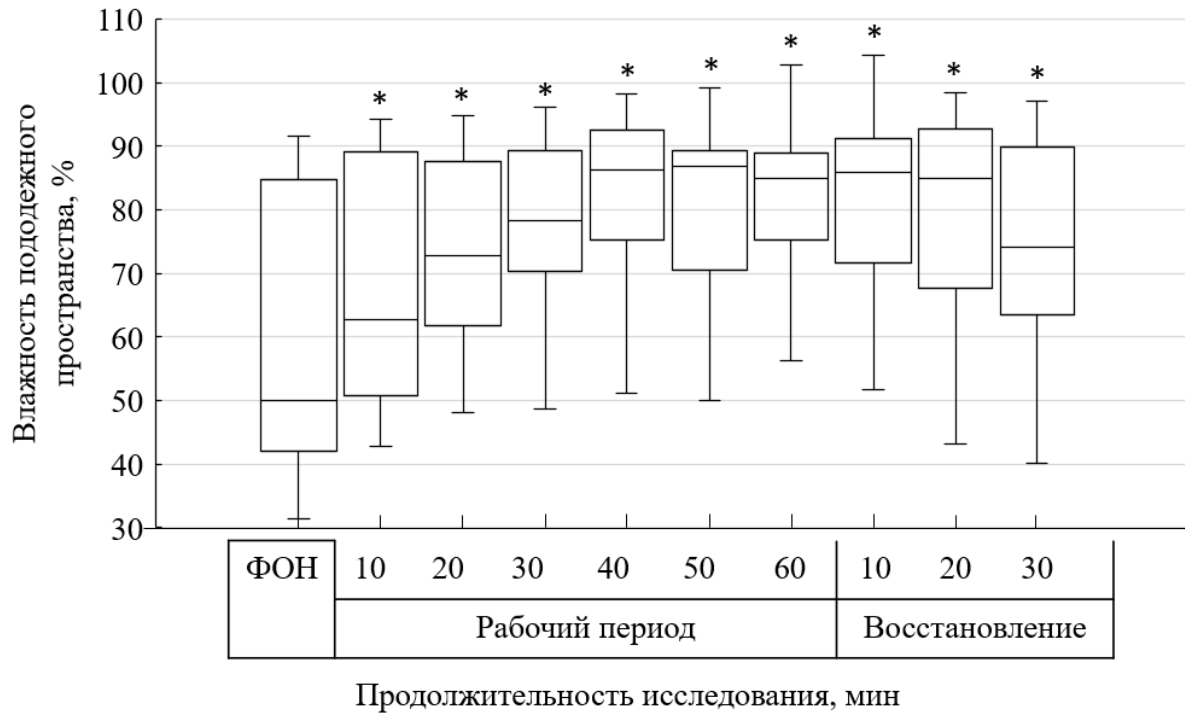


Рисунок 3.1.14 – Динамика усредненных значений влажности подкожного пространства за весь период исследования (объект 1), $n=6$, Me [25; 75] (* – $p<0,05$ по сравнению с фоновыми значениями)

При анализе результатов показателей теплового состояния добровольцев были выявлены статистически значимые различия в величинах СВТК, СВВК, $T_{п/о}$ и $RH_{п/о}$, обусловленные как конституциональными характеристиками добровольцев, так и изменчивостью климатических условий во время проведения исследований.

Медианные значения изменения теплосодержания в организме добровольцев в середине рабочего периода (на 30-й минуте), к его окончанию (на 60-й минуте) и в конце восстановительного периода составляли 0,71 [0,52; 1,85] кДж/кг, 1,62 [0,64; 2,25] кДж/кг и 0,94 [0,19; 1,84] кДж/кг соответственно, что свидетельствует о допустимых величинах этого показателя [26].

Снижение значений СВТК и $T_{п/о}$, увеличение $RH_{п/о}$ с 40-й минуты рабочего периода указывают на влияние общей термической нагрузки среды, которая компенсируется активацией механизма теплопотерь (испарение влаги

с поверхности тела человека и дыхательных путей), а также накоплением в пододежном пространстве влаги.

На рисунках 3.1.15 – 3.1.18 представлена динамика усредненных значений показателей теплового состояния добровольцев при выполнении работ в климатических условиях, превышающих верхнюю границу допустимых значений (объект 2). Значения, как и на объекте 1, регистрировались до начала работы (исходные значения показателей), во время выполнения рабочих операций в течение 60-ти минут и в течение 30-ти минутного периода восстановления.

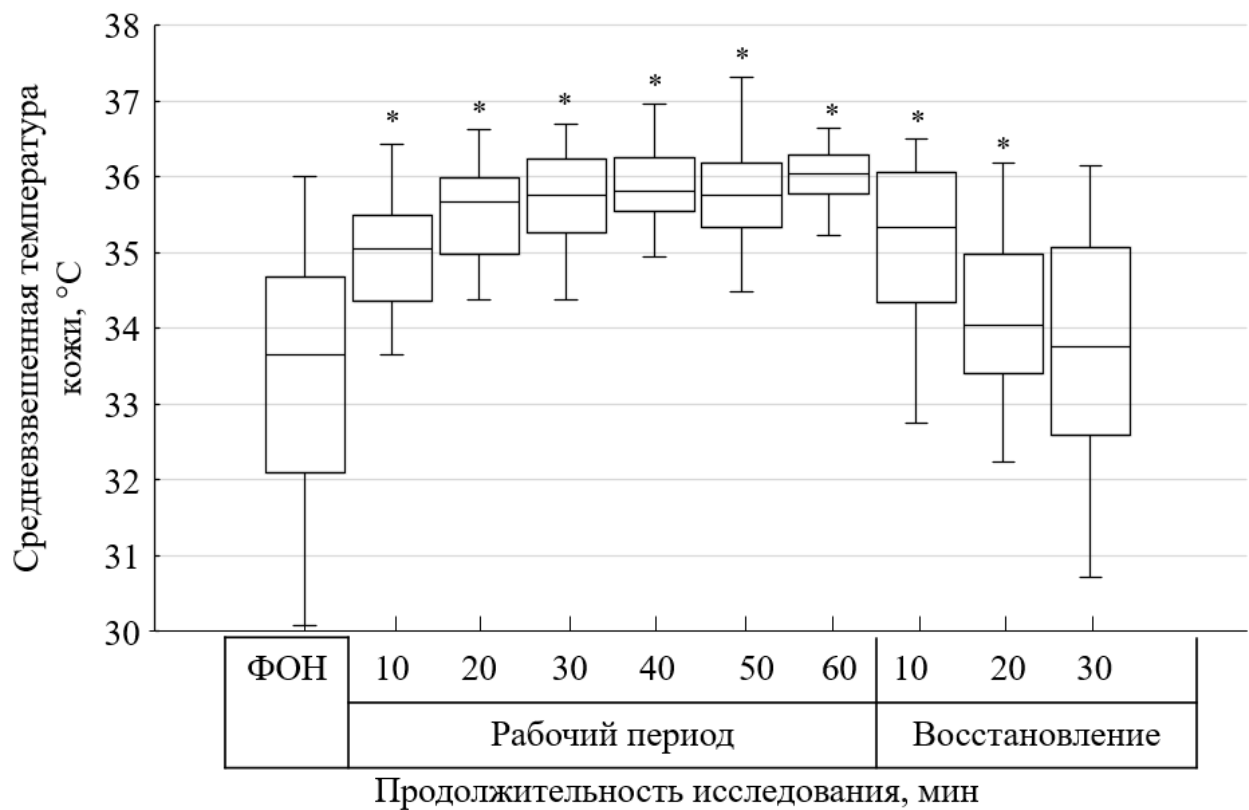


Рисунок 3.1.15 – Динамика усредненных значений средневзвешенной температуры кожи добровольцев за весь период исследования (объект 2), $n=5$, $Me [25; 75]$ (* – $p < 0,05$ по сравнению с фоновыми значениями)

Согласно данным, представленным на рисунке 3.1.15, во время первых 20-ти минут рабочего периода наблюдался рост усредненных значений СВТК, а с 30-й по 60-ю минуты – ее средние значения изменялись незначительно и к

концу рабочего периода составляли $35,84 \pm 0,72^{\circ}\text{C}$. Скорость изменения СВТК (по отношению к исходной величине показателя) за первые 20 минут составила $0,11^{\circ}\text{C}/\text{мин}$, а с 30-й по 60-ю минуты работы – менее $0,01^{\circ}\text{C}/\text{мин}$. Средние значения СВТК при выполнении работы выходили за пределы величины этого показателя ($35,4^{\circ}\text{C}$), соответствующего верхней границе предельно допустимого теплового состояния человека на период не более 1 часа за рабочую смену [26]. За 30-ти минутный период отдыха в условиях нагревающей среды средние значения СВТК снижались, однако полного восстановления до исходных значений не было зарегистрировано.

Динамика усредненных значений изменения теплосодержания (интегрального показателя теплового состояния), представленная на рисунке 3.1.16, указывает на то, что в течение первых 30-ти минут величина этого показателя не выходила за пределы предельно-допустимого теплового состояния человека для продолжительности не более 3 часов за рабочую смену [26]. Во второй половине рабочего периода, к 60-й минуте показатель достигал своего максимума в $3,96 \text{ кДж/кг}$, но не превышал значения в 4 кДж/кг для предельно-допустимого теплового состояния человека для продолжительности не более 1 часа за рабочую смену.

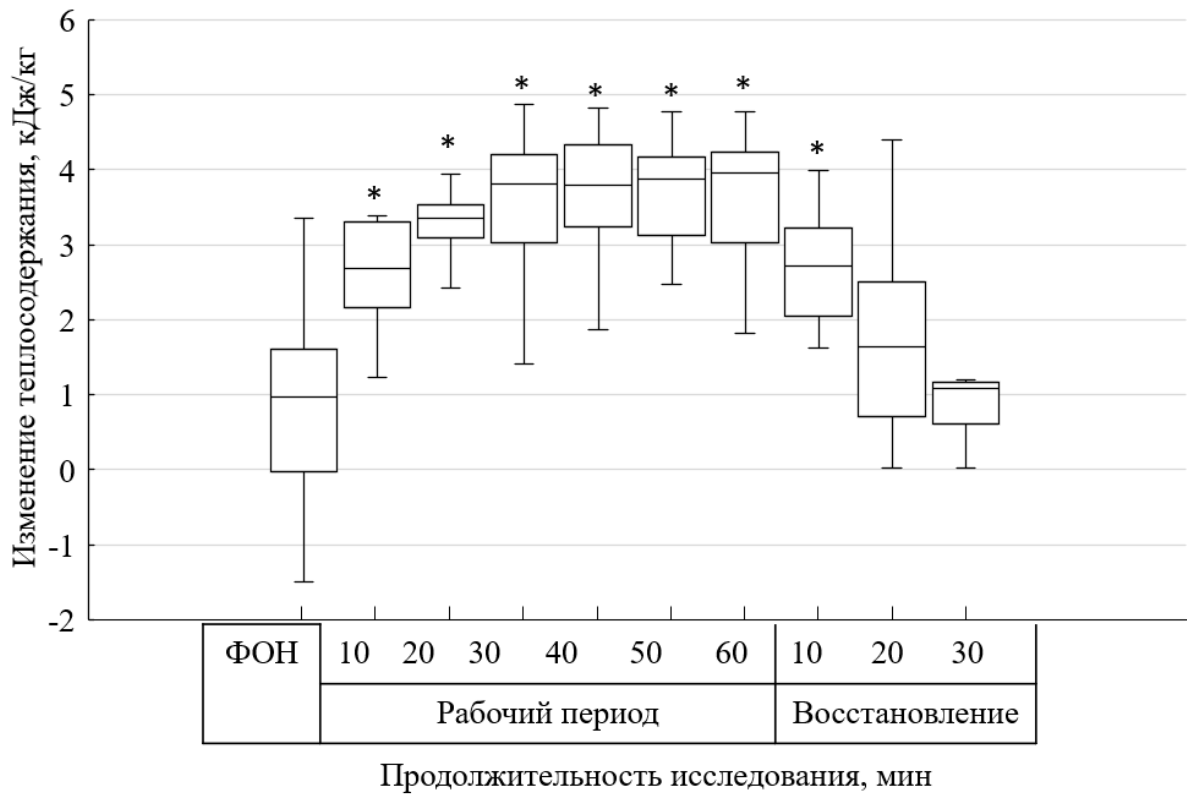


Рисунок 3.1.16 – Динамика усредненных значений изменения теплосодержания организма добровольцев за весь период исследования (объект 2), $n=5$, $Me [25; 75]$ (* – $p<0,05$ по сравнению с фоновыми значениями)

В процессе работы средние значения СВВК находились в диапазоне 47,6-53,0% (рисунок 3.1.17). Максимальные усредненные значения влажности пододежного пространства ($RH_{п/о}$, %) отмечались на 40-й минуте ($88,0 \pm 11,2$ %) при средних значениях за рабочий период равных $85,7 \pm 12,4$ % (рисунок 3.1.18). В восстановительном периоде значения этих показателей снижались незначительно вследствие накопления, выделенного в процессе работы пота в предметах комплекта СИЗ. Среднее значение температуры пододежного пространства за рабочий период составило $34,9 \pm 1,6^{\circ}C$.

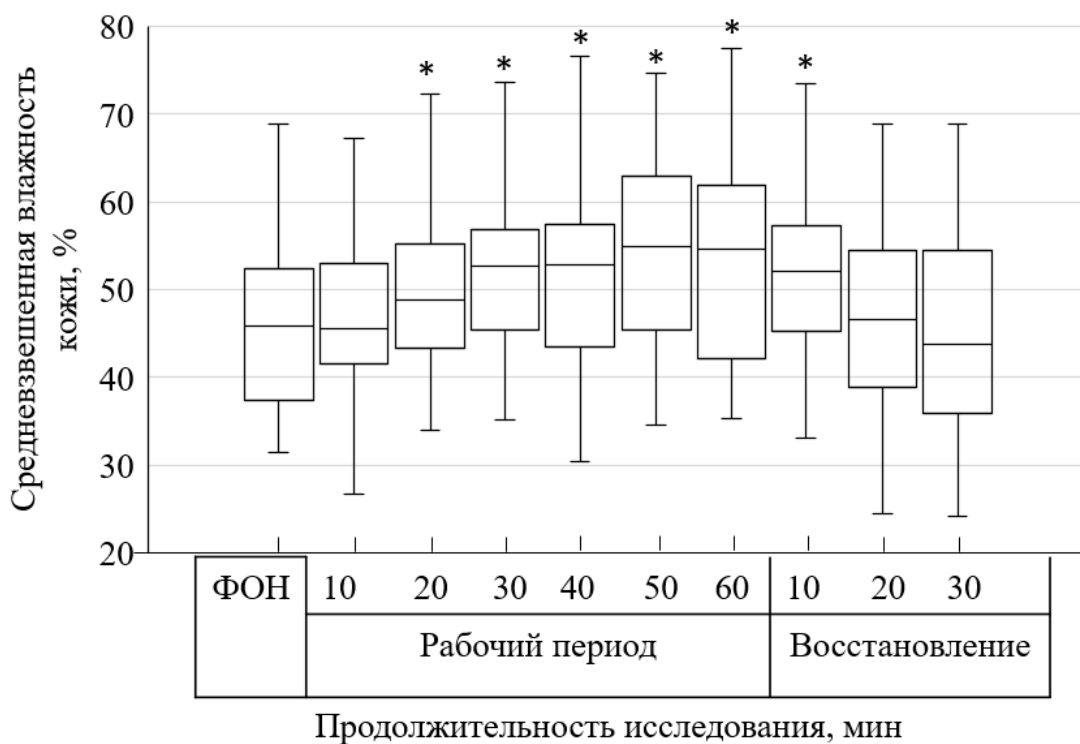


Рисунок 3.1.17 – Динамика усредненных значений средневзвешенной влажности кожи добровольцев за весь период исследования (объект 2), $n=5$, $Me [25; 75]$ (* – $p<0,05$ по сравнению с фоновыми значениями)

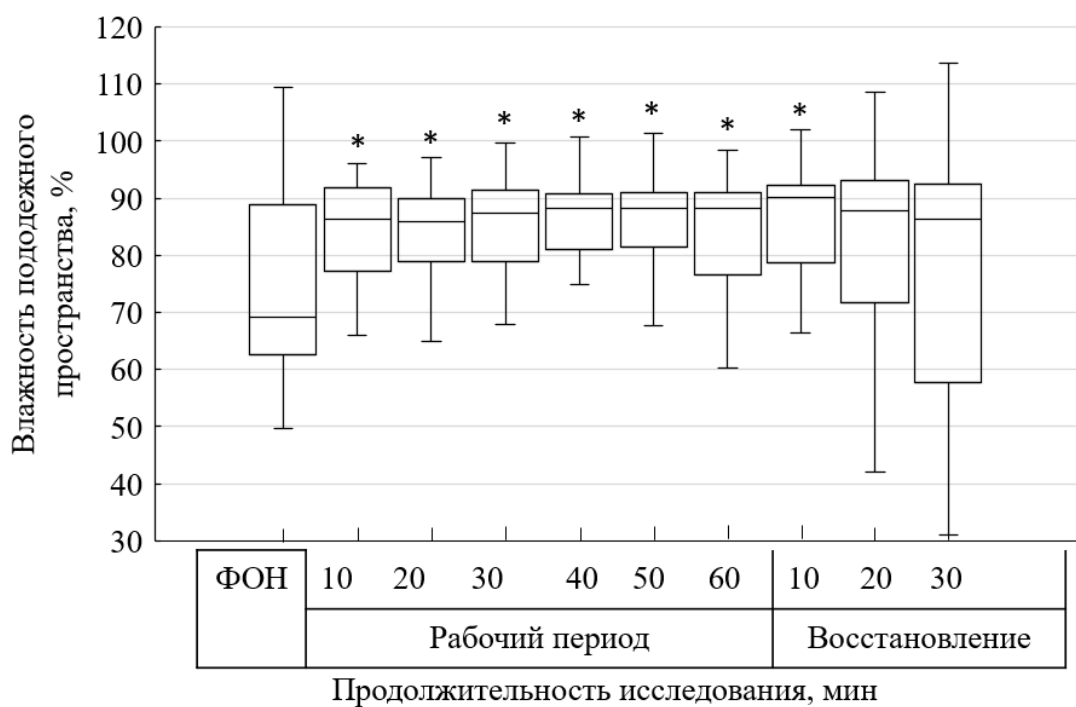


Рисунок 3.1.18 – Динамика усредненных значений влажности подкожного пространства за весь период исследования (объект 2), $n=5$, $Me [25; 75]$ (* – $p<0,05$ по сравнению с фоновыми значениями)

Динамика усредненных значений изменения теплосодержания на протяжении всего периода исследований на двух объектах электроэнергетики представлена на рисунке 3.1.19.

Динамика теплонакопления в организме добровольцев показала рост значения изменения теплосодержания $\Delta Q_{тс}$ на протяжении всего периода работы, как на первом объекте, так и на втором.

На объекте 1 полученные значения находились в пределах допустимых величин на всем протяжении исследования.

На объекте 2 уже на 10-ой минуте работы наблюдалось превышение допустимого значения $\Delta Q_{тс}$ (2,6 кДж/кг), которое продолжало расти до 60-й минуты вплоть до 3,96 кДж/кг, но не превышало верхнюю границу допустимого теплового состояния человека (4 кДж/кг), что соответствует предельно-допустимым величинам этого показателя на период не более 3 часов за рабочую смену.

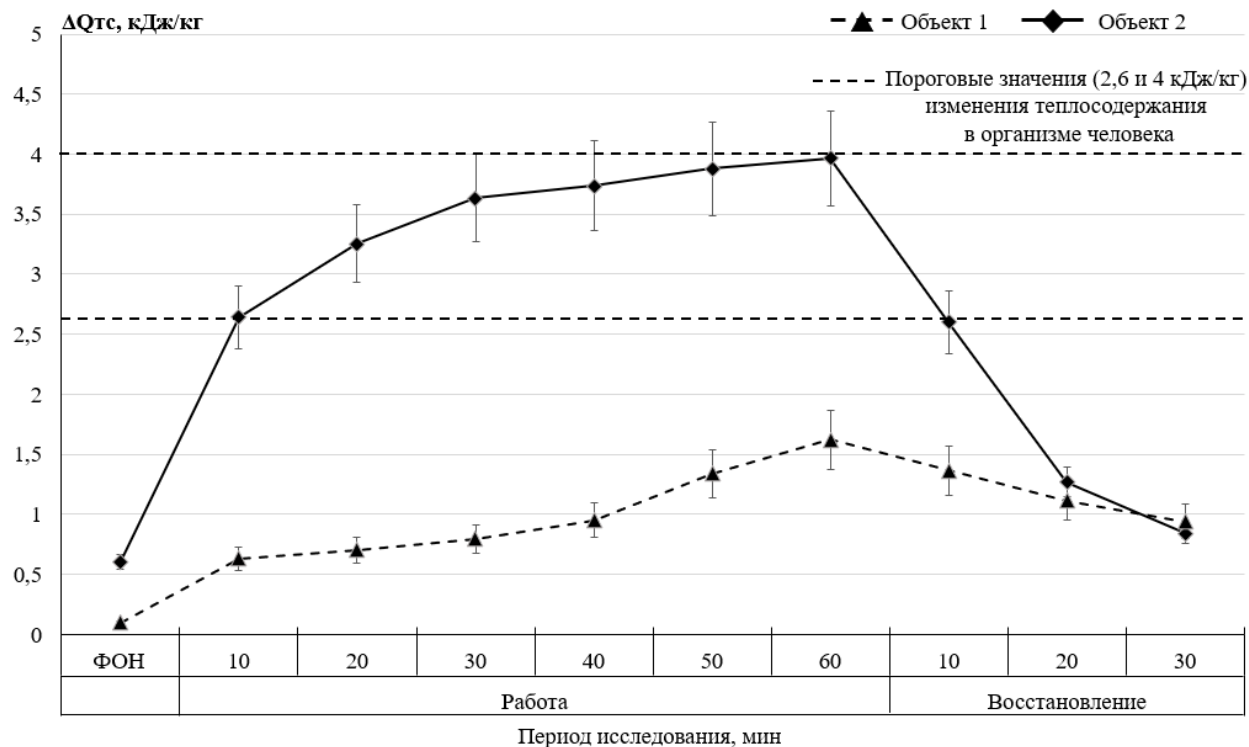


Рисунок 3.1.19 – Динамика изменения теплосодержания на протяжении всего периода исследований на двух объектах электроэнергетики

Однако стоит отметить, что на объекте 1 уже к 10-ой минуте восстановительного периода значение теплонакопления вернулось к допустимым значениям, а к 30-ой минуте вернулось практически к исходной (фоновой) величине.

Оценка риска перегрева организма по усредненному значению показателя теплонакопления за период работы $3,52 \pm 0,50$ кДж/кг указывает на выраженное напряжение реакций терморегуляции, которое может приводить к снижению физической работоспособности до 25%, снижению физической и умственной производительности труда до 27,9 и 22% соответственно [47]. Кроме того, так как результаты проведенных исследований свидетельствуют о значительном ухудшении теплового состояния добровольцев, использующих СИЗ, условия труда должны оцениваться также с учетом показателей функционального состояния организма работника в соответствии с п.п. 5.11.4 Р 2.2.2006-05 [40].

Анализ динамики температуры и влажности пододежного пространства показал, что использование СИЗ типа Эп-4(0) приводило к формированию замкнутого микроклимата под одеждой, характеризующегося повышением данных показателей в процессе выполнения работы. На объекте 1 данные показатели увеличивались в течении всего периода исследования, однако оставались в пределах, не вызывающих критического нарушения теплообмена. В то же время на объекте 2 наблюдалось значительное повышение как температуры, так и влажности пододежного пространства, что приводило к затруднению испарения пота (потоотделению), основного механизма охлаждения организма при высокой температуре окружающей среды.

Рост влажности пододежного пространства является ключевым неблагоприятным фактором, поскольку при высокой относительной влажности резко снижается эффективность потоотделения. Это приводит к накоплению избыточного тепла в организме и повышению риска

перегрева. Данный эффект усиливается при использовании защитной одежды, ограничивающей конвекцию и испарение.

Динамика средневзвешенной температуры кожи свидетельствует о достоверном ее повышении в процессе выполнения работ на обоих объектах, однако степень выраженности изменений существенно различается. В условиях объекта 1 увеличение температуры кожи носило умеренный характер и не выходило за пределы физиологически допустимых значений, что указывает на сохранение эффективных механизмов терморегуляции. На объекте 2 отмечался более выраженный рост температуры кожи и к 40-ой минуте работы составлял $35,81^{\circ}\text{C}$, что выходит за пределы величины этого показателя ($35,4^{\circ}\text{C}$), соответствующего верхней границе предельно допустимого теплового состояния человека на период не более 1 часа за рабочую смену и отражает значительное напряжение системы терморегуляции и увеличение тепловой нагрузки на организм.

Анализ теплосодержания организма подтверждает указанные тенденции. На объекте 1 величины теплонакопления ($0,71\text{--}1,62$ кДж/кг в рабочий период) оцениваются как допустимые, что соответствует сохранению теплового баланса организма. В условиях объекта 2 отмечается более выраженное увеличение теплосодержания (до $3,73$ кДж/кг к 40-й минуте и $3,96$ кДж/кг к 60-ой минуте), что указывает на развитие положительного теплового баланса, при котором количество поступающей (или генерируемой внутри) тепловой энергии превышает количество теплоты, отдаваемой во внешнюю среду. Однако уже за первые 10 минут восстановительного периода значение данного показателя снизилось до $2,58$ кДж/кг, что незначительно ниже верхней границы допустимого теплового состояния человека ($2,60$ кДж/кг), а к 30 минуте восстановительного периода значение вернулось к фоновым величинам.

3.3. Натурные и лабораторные исследования эффективности средств индивидуальной защиты от электрического поля промышленной частоты

Обеспечение сохранения здоровья электротехнического персонала достигается путем использования СИЗ от ЭП ПЧ для возможности проведения работ в течение всей рабочей смены. Сертификационные испытания СИЗ от ЭП ПЧ, проводимые исключительно в лабораторных условиях, выполняются в однородном ЭП ПЧ, тогда как на рабочих местах электротехнического персонала преобладает неоднородное ЭП. Следовательно, представляется целесообразным оценка защитных свойств СИЗ на рабочих местах в натурных (производственных) условиях, а также проведение лабораторных исследований, приближенных к натурным для верификации полученных значений.

При проведении натурных исследований защитных свойств комплектов по методике 1 диэлектрический манекен располагался вертикально под ошиновками с фоновыми уровнями напряженности ЭП ПЧ 19,02 кВ/м в области головы и 13,73 кВ/м в области груди. При производстве работ на земле (на потенциале земли) не предусмотрено использование электропроводящего экрана, однако при проведении исследований защитные свойства комплектов оценивались как с использованием электропроводящего экрана, так и без него.

При проведении исследований по методике 2 электропроводящий манекен располагался аналогично методике 1 при тех же уровнях напряженности ЭП ПЧ. В таблице 3.2.1 приведены рассчитанные коэффициенты экранирования для каждого из исследуемых образцов по двум методикам.

Таблица 3.2.1. Результаты натурных исследований защитных свойств экранирующих комплектов по методике 1 и 2

№ Образца	Коэффициент экранирования K_E , дБ (Методика 1)		Коэффициент экранирования, K_I , дБ (Методика 2)	
	С лицевым экраном	Без лицевого экрана	С лицевым экраном	Без лицевого экрана
Образец 1	68,82	36,20	50,32	51,93
Образец 2	65,12	58,30	51,44	54,15
Образец 3	61,46	51,65	53,67	45,25

Для верификации полученных данных натурных испытаний и расширения диапазона исследуемых величин были проведены лабораторные исследования с использованием модернизированного высоковольтного испытательного стенда промышленной частоты ФГБНУ «НИИ МТ». Манекен, для обоих методик, располагался вертикально под металлической пластиной, на которую подавалось напряжение, обеспечивая требуемый уровень напряженности ЭП ПЧ для моделирования условия натурных исследований. Помимо уровня ЭП ПЧ, приближенного к исследованиям в натурных условиях, в лабораторных условиях комплекты испытывались дополнительно на двух уровнях ЭП: 5 кВ/м (ПДУ за всю рабочую смену) и 25 кВ/м (максимальный ПДУ при котором производство работ без использования СИЗ запрещается) [39]. Лабораторные исследования по обеим методикам проводились аналогично натурным, результаты представлены в таблице 3.2.2.

Таблица 3.2.2. Результаты лабораторных исследований защитных свойств экранирующих комплектов по двум методикам

№ Образца	Напряженность ЭП ПЧ, кВ/м	Коэффициент экранирования K_E , дБ (Методика 1)		Коэффициент экранирования, K_I , дБ (Методика 2)	
		С лицевым экраном	Без лицевого экрана	С лицевым экраном	Без лицевого экрана
Образец 1	5,00	83,51	46,36	55,57	36,52
	19,20	84,71	46,10	44,06	38,43
	25,18	82,71	46,11	43,48	37,21
Образец 2	5,00	74,47	62,03	42,52	37,73
	19,20	80,21	68,23	43,61	42,91
	25,18	78,68	68,98	43,66	43,64
Образец 3	5,00	70,91	47,90	41,84	41,11
	19,20	71,83	46,78	43,87	32,61
	25,18	69,47	46,75	38,99	33,95

Стоит отметить, что напрямую нельзя сравнивать коэффициенты экранирования комплектов (K_E и K_I), полученные по двум методикам из-за различия контролируемых параметров в ходе исследований. Анализ литературных источников показал, что K_E , равный 80 дБ по методике 1 приблизительно соответствует K_I 40 дБ по методике 2 [123]. Исходя из полученных в ходе исследований данных на рисунке 3.2.1 представлено сравнение коэффициента экранирования трёх комплектаций СИЗ в натурных и лабораторных условиях по методикам 1 и 2, а также сопоставление с российскими и зарубежными требованиями.

Данные, полученные в ходе лабораторных исследований, имеют расхождение с натурными исследованиями менее 20% с учетом погрешности измерений, что указывает на адекватность лабораторных исследований, приближенных к натурным.

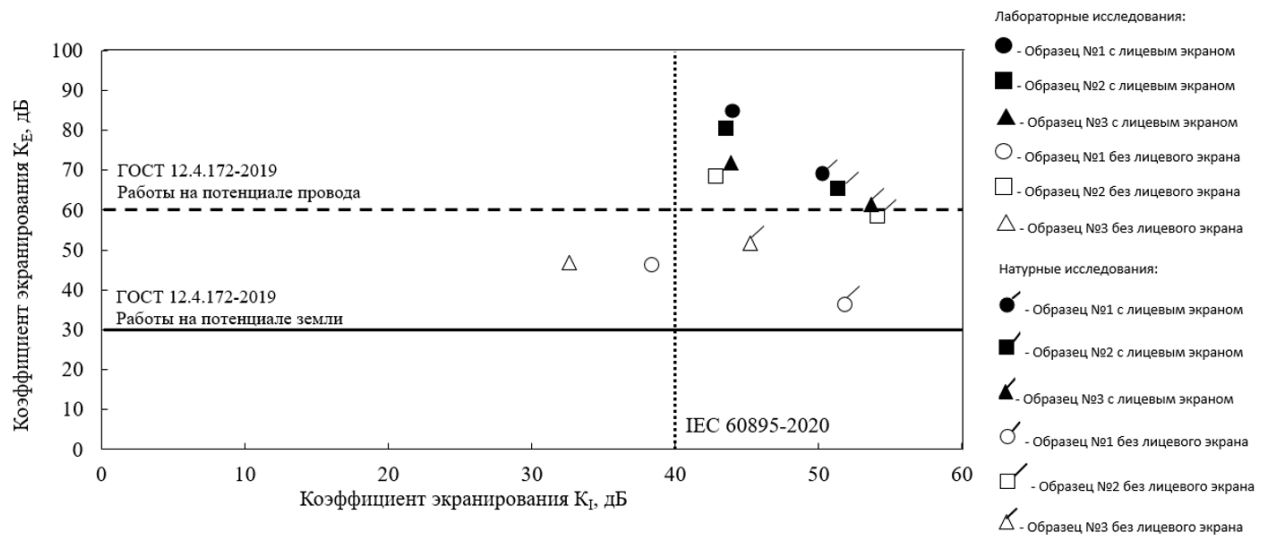


Рисунок 3.2.1 – Результаты исследований защитных свойств трёх комплектаций СИЗ в натурных и лабораторных условиях по двум методикам

Все комплектации СИЗ с лицевым экраном удовлетворяют как российским, так и зарубежным требованиям. Все исследуемые комплектации СИЗ имеют необходимые защитные свойства и удовлетворяют требованиям, предъявляемым к данным СИЗ в Российской Федерации при проведении работ на земле (30 дБ). При сертификационных испытаниях к коэффициенту экранирования K_E СИЗ типа Эп-4(0) предъявляются требования не менее 60 дБ без лицевого экрана. Следовательно, только образец 2 без лицевого экрана при исследовании в лабораторных условиях обладает достаточными защитными свойствами. Образец 1 и 3 без лицевого экрана не соответствуют зарубежным требованиям несмотря на соблюдение отечественных требований.

3.4. Результаты математического моделирования и анализ условий экспозиции при оценке эффективности средств индивидуальной защиты с учетом биологических эффектов

Оценка эффективности СИЗ от ЭП ПЧ за более чем 30-ти летний период остается практически неизменной и проводится исключительно по величине ослабления ЭП ПЧ внутри СИЗ, однако в настоящее время оценка степени

снижения возможных негативных эффектов на отдельные органы и системы не рассматривается.

В рамках планирования экспериментальных исследований по оценке биологической эффективности экранирования на животных с использованием математического моделирования была разработана численная модель условий экспозиции животных (рисунок 3.3.1). В ней были использованы 24 численных фантома лабораторных крыс, где 12 численных фантомов животных располагалась в условиях ЭП ПЧ 50 кВ/м, а другие 12 фантомов в условиях ослабленного ЭП ПЧ, соответствующего применению СИЗ.

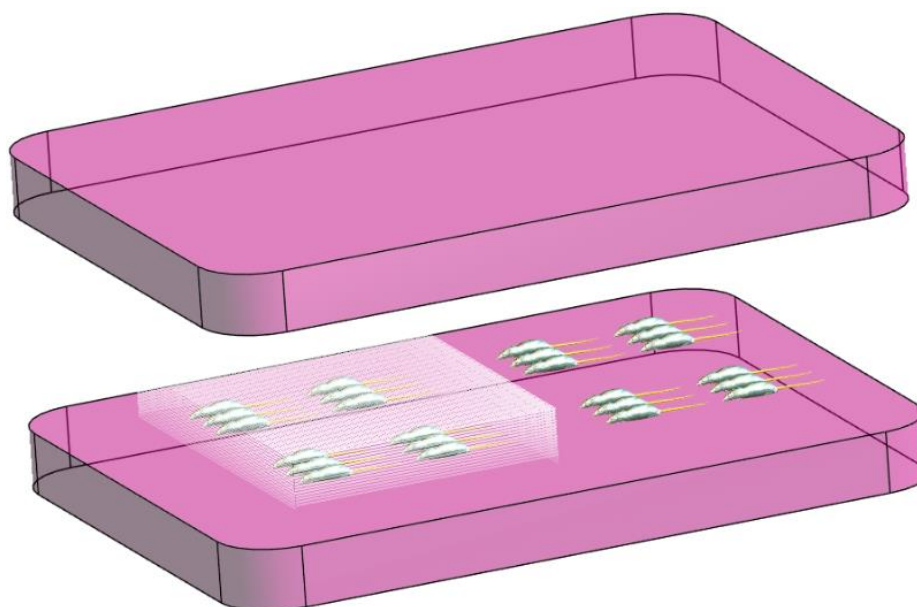


Рисунок 3.3.1 – Общий вид экспозиции с использованием математического моделирования

По результатам численной дозиметрии для условий планируемого эксперимента оценивалось среднее значение плотности наведенных токов для двух групп фантомов в отдельных органах и тканях. Результаты и структура распределения наведенных токов в теле фантома крысы представлена в таблице 3.3.1 и на рисунке 3.3.2.

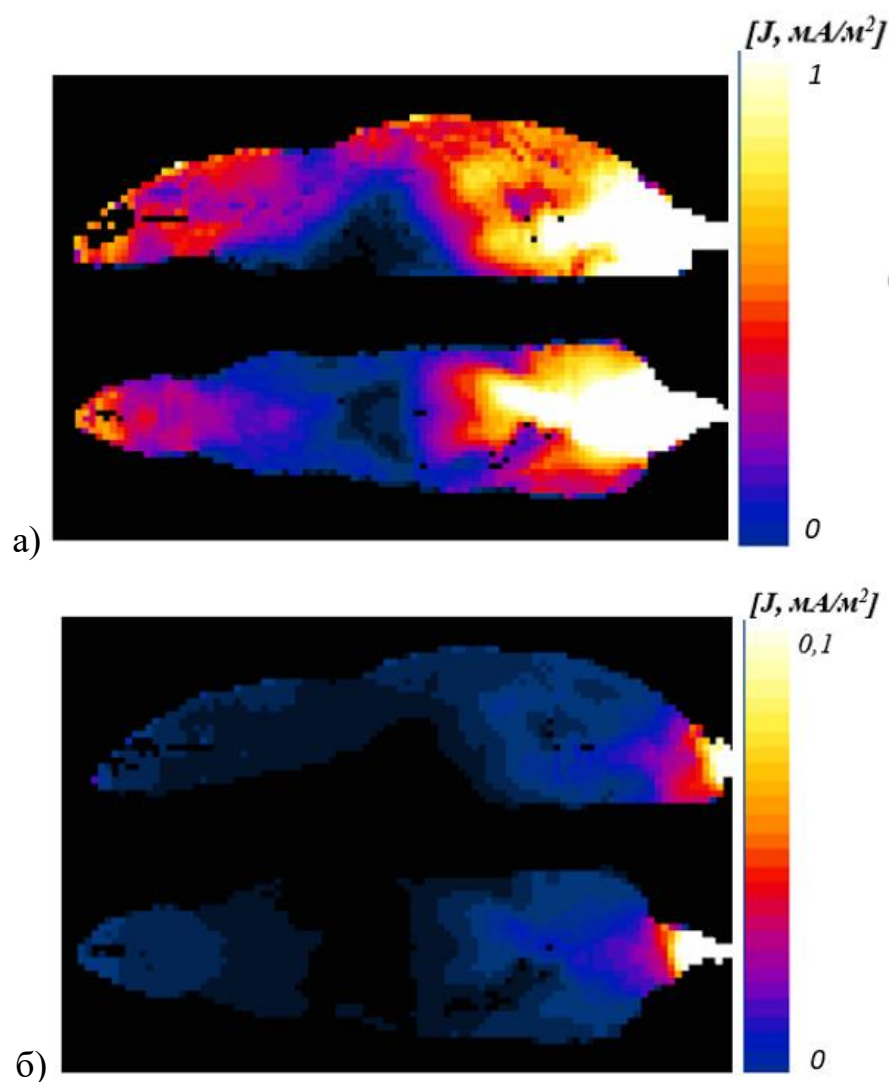


Рисунок 3.3.2 – Распределение плотности электрического тока в численных моделях лабораторных животных: а) без экранирования (10 ПДУ); б) находящихся в условиях экранирования (100 В/м)

Таблица 3.3.1. Плотность электрического тока в органах и тканях численных моделей лабораторных животных при различных условиях экспозиции

Орган/Ткань	Плотность токов, mA/m^2	
	Группа 1	Группа 2
Желудок	9,273	0,095
Селезенка	3,529	0,042
Кровь	1,340	0,022
Поджелудочная железа	1,260	0,012
Сердце	1,252	0,007
Слезная железа	0,991	0,013
Мышцы	0,959	0,020

Продолжение Таблицы 3.3.1

Орган/Ткань	Плотность токов, мА/м ²	
	Группа 1	Группа 2
Тимус	0,953	0,108
Средний мозг	0,853	0,015
Нервная ткань	0,781	0,010
Костный мозг	0,751	0,012
Средний мозг	0,595	0,010
Почки	0,583	0,011
Печень	0,501	0,007
Гипофиз	0,444	0,013

Результаты численной дозиметрии показали, что у фантомов крыс, находящихся в условиях ЭП ПЧ 50 кВ/м, максимальные значения плотности наведенных токов отмечались в желудке и достигали 9,27 мА/м², а также в селезенке – 3,53 мА/м². В крови, поджелудочной железе и сердце значения плотности наведенных токов находились в диапазоне 1,26 - 1,34 мА/м². В остальных тканях и органах фантома крысы значения не превышали 1 мА/м².

В условиях ослабления ЭП ПЧ с применением экранирования с помощью СИЗ до 80 дБ отмечалось снижение плотности токов в органах и тканях модели крысы. В мышечной и нервной тканях, а также в гипофизе и костном мозге экранированных крыс величина индуцированных токов была на порядок меньше, чем у животных, подвергавшихся воздействию ЭП 50 кВ/м без средства защиты. Снижение величины плотности индуцированных токов в соответствии с рассматриваемой проблемой биологического действия ЭП ПЧ в селезенке и крови в модели животных при использовании экранирования достигало более двух порядков.

3.5. Экспериментальное исследование и анализ отдельных биологических эффектов воздействия электрического поля промышленной частоты в условиях экранирования

Для оценки возможных биологических эффектов воздействия ЭП ПЧ с использованием экранирующего материала было проведено экспериментальное исследование на лабораторных беспородных крысах самцах. Животные были разделены на 3 равные группы по 12 животных в каждой. Крысы в 1 группе подвергались воздействию ЭП ПЧ напряженностью 50 кВ/м, но с ослаблением ЭП ПЧ с помощью экранирующего материала с коэффициентом экранирования 80 дБ (экспозиция экранирования). Напряженность ЭП под экранирующим материалом у животных группы экранирования не превышала 100 В/м. Животные 2 группы подвергались воздействию ЭП ПЧ напряженностью 50 кВ/м без использования экранирующего материала (истинная экспозиция). Животные второй группы накрывались не экранирующей тканью с воздухопроницаемыми свойствами, схожими с экранирующим материалом. Группа 3 (мнимая экспозиция) содержалась в аналогичных с экспонированными животными условиях, с использованием экранирующего материала, за исключением воздействия ЭП ПЧ. Уровень напряженности ЭП ПЧ у группы мнимой экспозиции не превышал 100 В/м.

Животные подвергались экспозиции 4 часа в день, 5 дней в неделю в течении 4 недель. Продолжительность экспозиции крыс рассчитывалась по формуле (3.4.1), что эквивалентно восьмичасовой рабочей смене человека [54].

$$lg_{t_{\text{ч}}} = 0,47 + 1,18 * t_{\text{кр}}, \quad (2.1)$$

где $t_{\text{ч}}$ — время воздействия фактора на человека, сутки; $t_{\text{кр}}$ — время воздействия фактора на животное, сутки.

После 2 и 4 недели экспозиции у всех трех групп животных проводился забор крови из хвостовой вены для оценки общего анализа крови и резистентной стойкости эритроцитов животных.

В конце эксперимента проводился забор костного мозга из бедренной кости животных для оценки цитоморфологического состава костного мозга.

Динамика гемолиза после 2 и 4 недель эксперимента представлена в виде кислотных эритрограмм на рисунках 3.4.1 и 3.4.2 соответственно. Структура распределения эритроцитов в условиях *in vitro* по показателям резистентности эритроцитов у крыс в группе истинной экспозиции характеризовалась достоверным снижением общего времени кислотного гемолиза (10,7%) относительно двух других групп спустя 2 и 4 недели воздействия. После 4-х недель экспозиции общее время гемолиза у групп мнимой и экранированной экспозиции увеличилось на 30%.

Латентный период гемолиза через 2 недели экспозиции у животных группы истинной экспозиции характеризовался тенденцией к снижению (4,5%), а спустя 4 недели – к повышению (5%) относительно аналогичных временных показателей у крыс экранированной и контрольной групп. Такие параметры, как собственное время, время 50% и максимальная скорость гемолиза проявляли сходную зависимость от времени экспозиции: снижение через 2 недели и повышение на 4 неделю воздействия ЭП ПЧ.

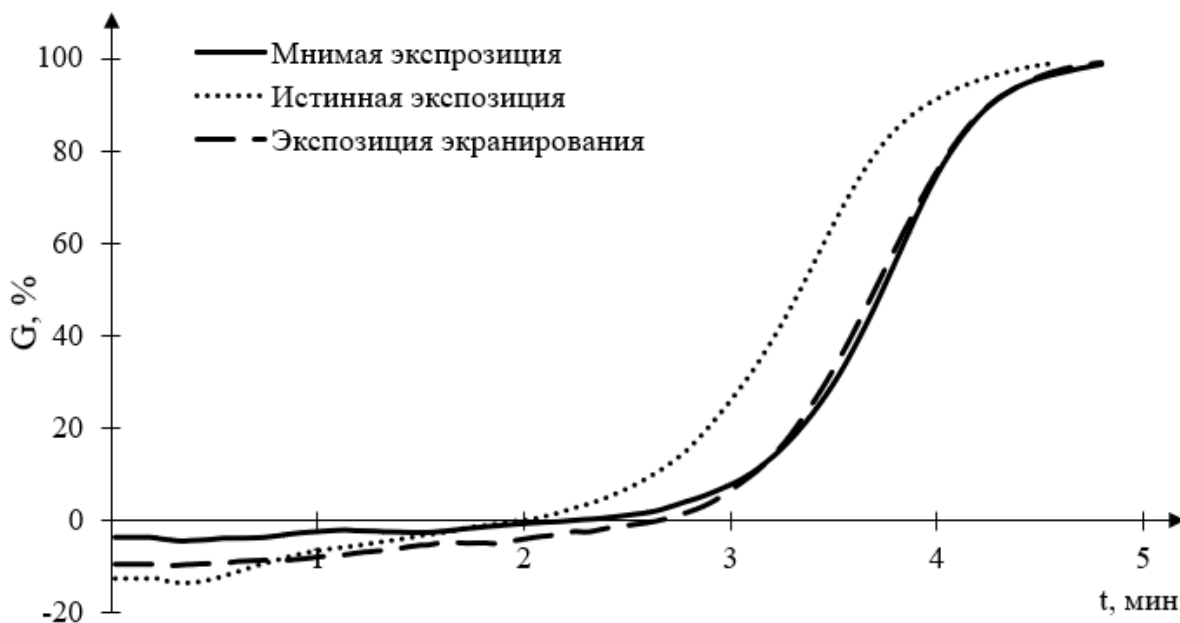


Рисунок 3.4.1 – Динамика гемолиза после 2 недель эксперимента в виде кислотных эритрограмм

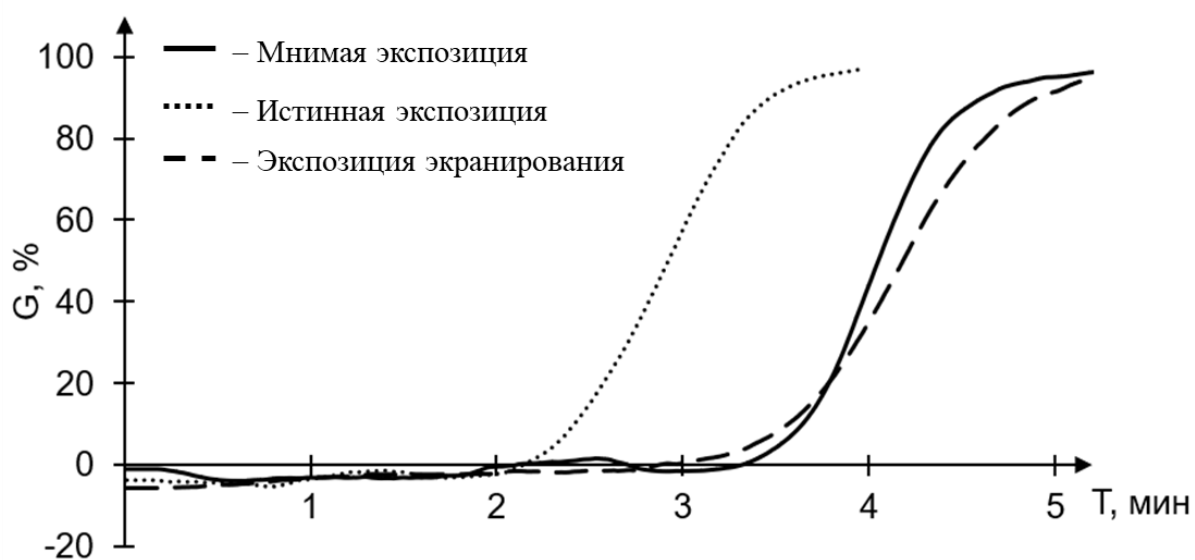


Рисунок 3.4.2 – Динамика гемолиза после 4 недель эксперимента в виде кислотных эритрограмм

Отмеченные изменения характера резистентности эритроцитов в условиях *in vitro* по данным кислотных эритрограмм (повышение общего

времени гемолиза) крыс после нахождения в ЭП ПЧ может быть вызвано поступлением в периферическую кровь разных по возрастному составу красных клеток крови, а также с нарушениями структурно-функциональных свойств их мембран [51]. Эффективность доставки кислорода в ткани в значительной степени зависит от состояния микроциркуляции и реологических свойств крови, которые связаны с состоянием эритроцитов [114], причем изменения в реологии наблюдались у крыс при воздействии ЭП ПЧ по 8 часов в день в течение 30 дней [74]. В пользу этого положения свидетельствует увеличение латентного времени гемолиза эритроцитов крови крыс на 4 неделе экспозиции в ЭП ПЧ, связанное с повышением резистентности мембран и/или снижением степени повреждения клеток, что также влияет на состояние микроциркуляторного кровотока и кислородную обеспеченность тканей.

Результаты гематологических показателей крыс представлены в таблице 3.4.1.

Анализ гематологических показателей крыс экранированной и контрольной групп выявил общий колебательный характер их изменений, а также аналогичных параметров в группе истинной экспозиции, который проявлялся только тенденцией и не достигал статистически достоверного уровня. Отмечались тенденции к снижению числа лейкоцитов, гранулоцитов, среднего содержания гемоглобина в эритроците, а также тенденции к увеличению гемоглобина и гематокрита как после 2, так и 4 недели эксперимента у групп экранированной и истинной экспозиции относительно группы мнимой экспозиции.

Таблица 3.4.1 - Гематологические показатели крыс после 2 и 4 недели экспозиции

	Мнимая экспозиция 2 неделя	Экспозиция экранирования 2 неделя	Истинная экспозиция 2 неделя	Мнимая экспозиция 4 неделя	Экспозиция экранирования 4 неделя	Истинная экспозиция 4 неделя
Лимфоциты, 10 ⁹ /л	8,50[6,18;10,08]	7,05[6,68;7,53]	6,80[5,45;8,10]	7,70[7,05;9,88]	6,55[5,08;8,63]	6,10[5,30;6,78]**
Эозинофилы, моноциты, 10 ⁹ /л	8,15[7,03;10,05]	8,35[7,48;9,13]	7,40[6,85;8,90]	9,05[8,45;10,65]	8,00[6,53;9,35]	7,90[7,33;8,70]*
Гранулоциты, 10 ⁹ /л	3,75[3,25;4,70]	3,60[3,10;3,75]	3,40[2,65;3,60]	4,10[3,38;5,10]	2,85[2,53;3,55]*	3,95[3,48;4,93]
Лимфоциты, %	39,65[35,73;44,85]	37,85[35,25;38,88]	40,50[33,70;42,75]	37,85[36,28;43,38]	38,45[34,33;43,23]	34,10[32,90;34,75]* *
MID (эозинофилы, моноциты), %	41,20[38,70;42,18]	43,85[42,35;45,13]*	42,60[40,60;43,80]	42,60[40,63;45,70]	44,05[42,90;45,45]	44,10[42,93;45,28]
Гранулоциты, %	18,95[15,10;20,90]	18,80[15,95;20,50]	16,80[13,90;22,80]	17,90[16,30;22,05]	17,15[11,28;20,15]	20,65[19,68;23,63]
Эритроциты, 10 ¹² /л	7,58[7,10;7,66]	7,91[7,67;8,33]*	7,48[7,17;8,00]	7,95[7,47;8,29]	8,68[8,37;9,03]	8,36[8,17;8,65]*
Гемоглобин, г/л	150,50[147,25;153, 75]	160,00[153,00;163,2 5]*	152,00[149,50;158, 00]	157,50[148,25;162, 00]	165,00[156,75;170, 50]	162,00[153,75;167, 00]
Гематокрит, %	31,95[31,08;32,63]	34,15[32,73;35,28]* *	32,80[30,55;34,20]	33,85[32,60;35,35]	36,15[34,48;37,40]*	35,45[34,43;36,13]
Средний объем эритроцита, фл	42,70[41,90;43,45]	42,95[41,60;43,40]	42,50[41,50;44,65]	43,10[42,53;43,65]	41,70[40,68;43,68]	42,60[41,43;43,38]
Тромбоциты, 10 ⁹ /л	290,50[272,25;306, 75]	293,00[270,50;332,0 0]*	253,00[219,50;269, 00]	278,00[236,00;354, 50]	270,00[246,75;305, 00]	305,50[272,75;334, 50]
Средний объем тромбоцита, фл	9,00[8,80;9,23]	8,90[8,80;9,08]	9,10[8,85;9,15]	9,20[8,88;9,55]	9,05[8,80;9,30]	9,25[9,05;9,43]
Тромбокрит, %	0,26[0,24;0,27]	0,26[0,25;0,29]*	0,22[0,19;0,24]	0,24[0,21;0,33]	0,25[0,22;0,27]	0,28[0,25;0,30]

* – p<0,05; ** – p<0,01 по сравнению с показателями мнимой экспозиции

В соответствии с результатами эксперимента, в периферической крови животных группы истинной экспозиции отмечено достоверное снижение относительно других групп крыс числа эритроцитов (3,6%) и лимфоцитов (20%) на фоне повышения содержания MID (моноциты, эозинофилы и базофилы) (38%) на 4 неделе экспозиции (рис 3.4.3 – 3.4.5).

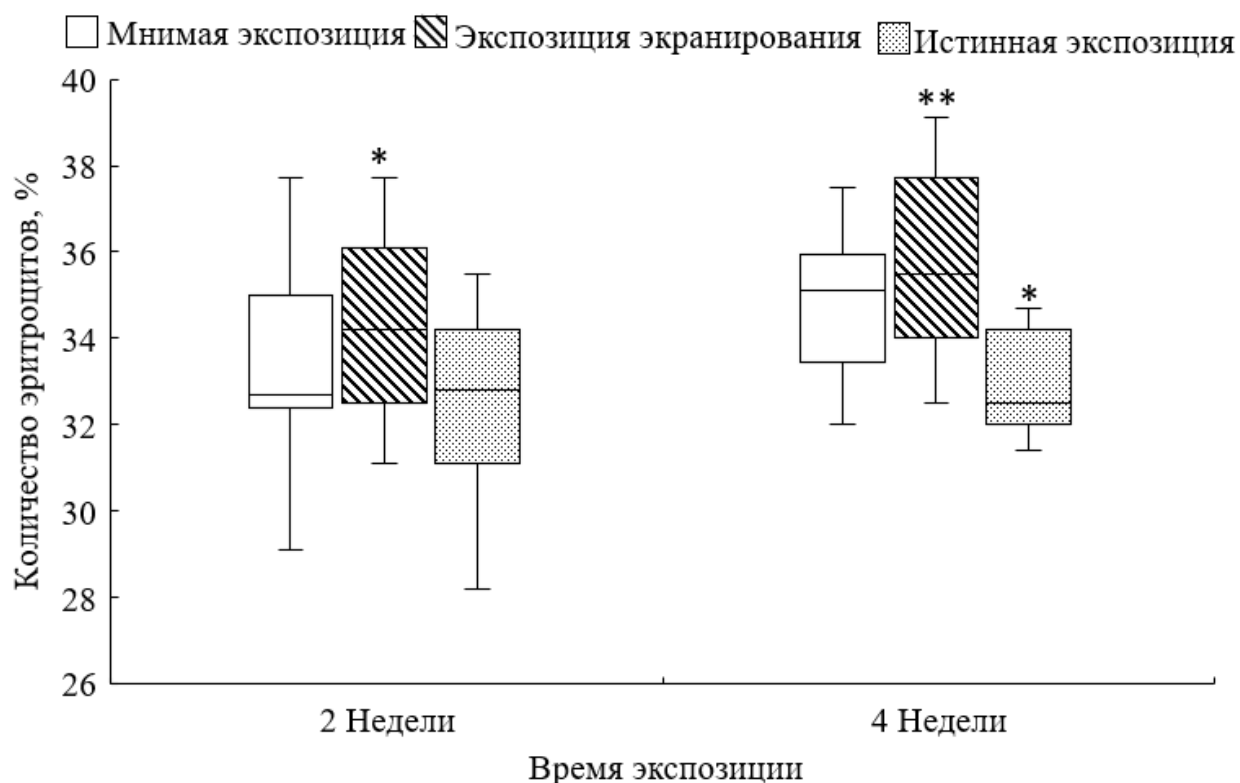


Рисунок 3.4.3 - Процентное содержание эритроцитов в группах животных с мнимой, истинной экспозициях и экранированной группе после 2 и 4 недели эксперимента (* – $p < 0,05$; ** – $p < 0,01$ по сравнению с показателями мнимой экспозиции)

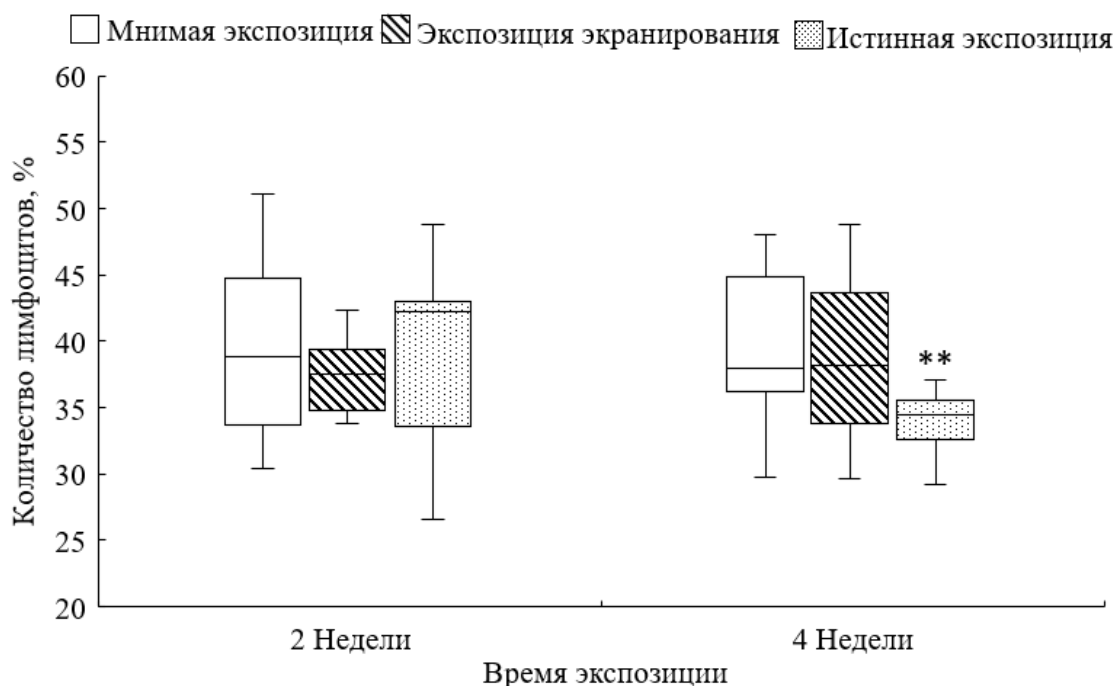


Рисунок 3.4.4 – Процентное содержание лимфоцитов в группах животных с мнимой, истинной экспозициях и экранированной группе после 2 и 4 недели эксперимента (** – $p < 0,01$ по сравнению с показателями мнимой экспозиции)

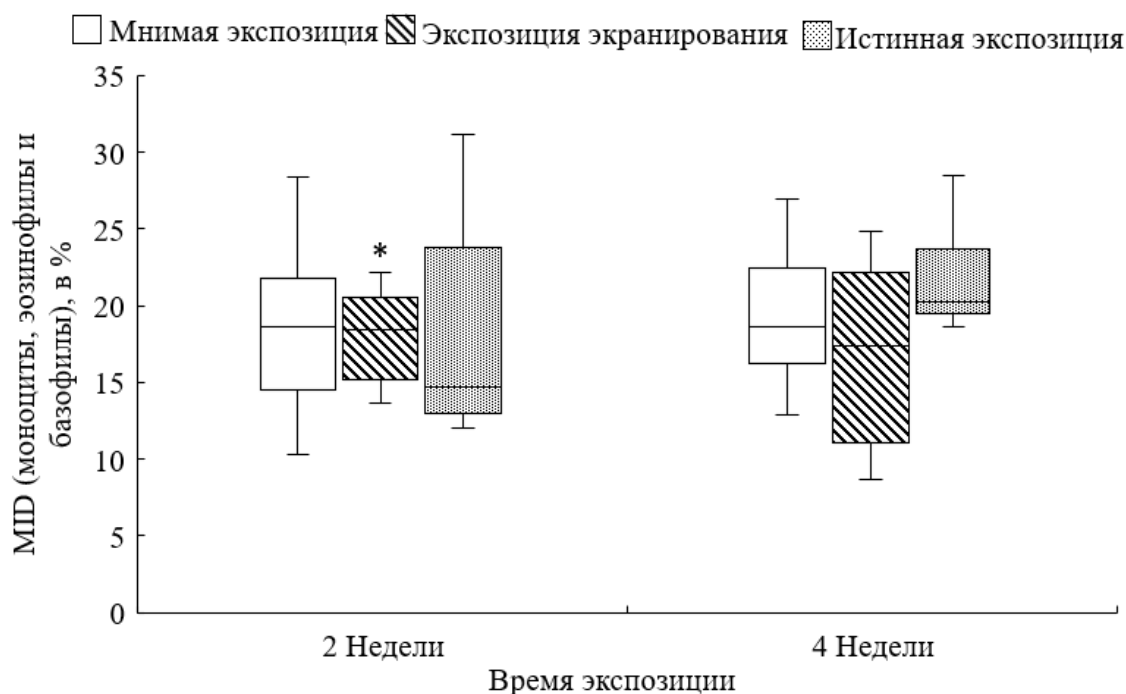


Рисунок 3.4.5 – Процентное содержание MID (моноциты, эозинофилы и базофилы) в группах животных с мнимой, истинной экспозициях и экранированной группе после 2 и 4 недели эксперимента (* – $p < 0,05$ по сравнению с показателями мнимой экспозиции)

Анализ представленных данных общего анализа крови свидетельствует о формировании у экспериментальных животных комплексной системной реакции, затрагивающей основные звенья кроветворения – лейкоцитарное, эритроцитарное и тромбоцитарное. Наиболее показательным является снижение абсолютного и относительного содержания лимфоцитов на фоне колебаний гранулоцитарного и моноцитарного звеньев, что может указывать на развитие стресс-индуцированной лимфопении и перераспределение иммунокомпетентных клеток. Одновременно наблюдаемые изменения в системе врожденного иммунитета (MID, гранулоциты) позволяют предположить наличие компенсаторной активации воспалительно-фагоцитарных механизмов, направленных на поддержание гомеостаза.

Изменения эритроцитарных показателей, включая тенденцию к повышению уровня эритроцитов, гемоглобина и гематокрита в отдельных группах, могут свидетельствовать о развитии компенсаторных реакций, направленных на усиление газотранспортной функции крови, что нередко наблюдается при хроническом функциональном напряжении организма или гипоксических состояниях. При этом отсутствие выраженных сдвигов в среднем объеме эритроцитов указывает на сохранность качественных характеристик эритропоэза и отсутствие признаков макро- или микроцитарной анемии.

Сдвиги в тромбоцитарном звене, проявляющиеся увеличением количества тромбоцитов и тромбокрита, могут отражать активацию системы гемостаза и повышение прокоагулянтного потенциала крови, что является типичным компонентом адаптационно-стрессовой реакции и может сопровождаться изменениями микроциркуляции. В совокупности выявленные изменения формируют картину напряжения регуляторных механизмов с вовлечением иммунной, кроветворной и сосудисто-гемостатической систем.

Таким образом, полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что воздействие исследуемого фактора приводит к развитию адаптационно-компенсаторных процессов с признаками перестройки иммунной системы под

воздействие вредного фактора, умеренной стимуляции эритропоэза и активации тромбоцитарного звена. Данные изменения могут рассматриваться как ранние маркеры функциональных нарушений системы кроветворения и свидетельствуют о потенциальном риске развития более выраженных отклонений от физиологической нормы при длительном или более интенсивном воздействии.

Сопоставление данных общего анализа крови с результатами исследования резистентности эритроцитов позволяет выявить согласованные изменения, отражающие динамику адапционно-компенсаторных процессов в системе кроветворения в результате воздействия ЭП ПЧ. Так, на фоне выявленного по данным исследования периферической крови повышения уровня эритроцитов, гемоглобина и гематокрита в группе истинной экспозиции, изменения параметров кислотных эритрограмм свидетельствуют о функциональной перестройке популяции эритроцитов, направленной на поддержание их устойчивости к повреждающим воздействиям. Увеличение общего времени гемолиза через 2 недели в группе истинной экспозиции указывает на повышение мембранной резистентности эритроцитов, что может рассматриваться как ранняя компенсаторная реакция.

Однако к 4-й неделе наблюдается изменение характера этих процессов: несмотря на увеличение количественных показателей красной крови, в группе истинной экспозиции не происходит дальнейшего увеличения времени гемолиза, в отличие от групп экранированной и мнимой экспозиций, где данный показатель возрастает. Это может свидетельствовать об истощении адаптационных резервов эритроцитарного звена. Одновременно выявленные сдвиги латентного периода и временных характеристик гемолиза (снижение на 2-й неделе и повышение на 4-й) отражают фазность адаптационного ответа - от начальной мобилизации к последующей перестройке мембранных свойств эритроцитов.

В целом полученные данные свидетельствуют о развитии комплексной адапционно-компенсаторной реакции, при которой на ранних этапах (2

недели) преобладает повышение резистентности эритроцитов и активация эритропоэза, тогда как на более поздних сроках (4 недели) формируется состояние функционального напряжения с признаками ограничения адаптационных возможностей.

Результаты исследования пунктата костного мозга крыс представлены в таблице 3.4.2. Анализ результатов выявил увеличение числа миелоцитов (5%) и палочкоядерных нейтрофилов (5,8%) у животных группы истинной экспозиции относительно других групп спустя 4 недели эксперимента. Отмечено также повышенное лейкоэритробластического отношения (18%) на фоне снижения содержания эозинофилов (5%), базофильных (11%) и оксифильных эритробластов (13%) после 4 недель пребывания в ЭП ПЧ у крыс группы животных, подвергавшихся истинной экспозиции, относительно двух других групп. Аналогичные цитоморфологические показатели костного мозга у крыс экранированной и контрольной групп в течение всего исследования не проявляли достоверных различий между обеими группами и имели исключительно колебательный характер.

Таблица 3.4.2 - Результаты исследования пунктата костного мозга крыс

Показатели	Мнимая экспозиция, в %	Экспозиция экранирования, в %	Истинная экспозиция, в %
Промиелоциты	1,00±0,07	0,95±0,05	1,00±0,08
Миелоциты	5,05±0,27	5,70±0,50	5,25±0,23
Метамиелоциты	4,41±0,21	4,05±0,32	4,50±0,24
Палочкоядерные	8,73±0,58	9,10±0,54	9,55±0,62
Сегментоядерные	15,55±0,66	16,90±0,69	16,50±1,09
Эозинофилы	0,96±0,29	0,75±0,20	0,65±0,20
Базофилы	0,00±0,00	0,05±0,05	0,00±0,00
Лимфоциты	22,14±0,64	22,75±0,65	21,05±0,72
Моноциты	6,32±0,42	6,15±0,46	6,25±0,26
Клетки белой крови	64,14±0,69	66,40±0,80	64,75±1,37
Лейкоэритробластическое отношение	1,80±0,05	2,00±0,08	1,88±0,12
Проэритробласты	0,23±0,08	0,50±0,07	0,25±0,08

Продолжение Таблицы 3.4.2

Показатели	Мнимая экспозиция, в %	Экспозиция экранирования, в %	Истинная экспозиция, в %
Базофильные эритробласты	4,55±0,38	4,30±0,25	5,20±0,21
Полихроматофильные эритробласты	16,73±0,34	15,60±0,41	15,85±0,55
Оксифильные эритробласты	14,18±0,46	13,25±0,35	13,85±0,84
Клетки красной крови	35,86±0,69	33,60±0,80	35,25±1,37

Анализ миелограммы показывает, что в гранулоцитарном ростке у животных группы истинной экспозиции отмечается тенденция к увеличению доли более зрелых форм (палочкоядерные и сегментоядерные нейтрофилы) при относительной стабильности или незначительных колебаниях ранних предшественников (промиелоциты, миелоциты, метамиелоциты). Такая картина может свидетельствовать о смещении дифференцировки в сторону ускоренного созревания клеток и выходе зрелых форм в периферическую кровь, что согласуется с данными общего анализа крови, где наблюдаются изменения гранулоцитарного звена и признаки напряжения врождённого иммунитета. Одновременно некоторое снижение эозинофилов в группе истинной экспозиции может указывать на неравновесные изменения реакций или отклонения в созревании отдельных стадий клеток крови в костном мозге.

Наиболее значимые изменения выявляются в эритроидном ростке. Снижение доли полихроматофильных эритробластов и клеток красной крови в группе экранирования, а также колебания содержания базофильных и оксифильных форм отражают нарушение нормальной последовательности созревания эритроидных клеток. Это указывает на изменение кинетики эритропоэза, при котором может происходить либо ускоренное созревание с преждевременным выходом клеток, либо, напротив, частичное угнетение отдельных стадий дифференцировки. Такие сдвиги хорошо согласуются с результатами кислотных эритрограмм: изменение резистентности

эритроцитов и фазности гемолиза отражает не только состояние циркулирующих клеток, но и качество их формирования в костном мозге.

Отдельного внимания заслуживает лейкоэритробластическое соотношение, которое демонстрирует тенденцию к увеличению в группе экранированной экспозиции, что может свидетельствовать об относительном преобладании лейкопоза над эритропозом. Это дополнительно подтверждает наличие перераспределения ресурсов кроветворения в сторону поддержания иммунных механизмов в условиях воздействия. В то же время в группе истинной экспозиции данный показатель остается ближе к значениям мнимой экспозиции, что может указывать на более сбалансированную, но напряженную регуляцию гемопоэза.

В совокупности можно сделать вывод, что воздействие ЭП ПЧ напряженностью 50 кВ/м может вызывать не только изменения показателей периферической крови и функциональных свойств эритроцитов, но и затрагивает центральное звено кроветворения – костный мозг. Наблюдаемые сдвиги могут отражать развитие адаптационно-компенсаторной перестройки гемопоэза, характеризующейся ускорением созревания клеток гранулоцитарного ряда, модификацией эритропоза и изменением баланса между различными ростками кроветворения.

Представленные результаты экспериментального изучения эффектов подострых воздействий ЭП ПЧ на систему крови и кроветворения экспериментальных животных с учетом возможных эффектов применения материалов, используемых в СИЗ дополнительно подтверждают не только биологическую эффективность воздействия ЭП на организм, в первую очередь, на изменения показателей периферической крови и функциональных свойств эритроцитов, но и дают дополнительное основание для утверждения о необходимости применения средств защиты для обеспечения сохранности гомеостаза.

3.6. Регламентация труда и отдыха при применении средств индивидуальной защиты в условиях нагревающей среды на основании физиолого-гигиенической оценки теплового состояния организма человека

Исходя из требований Правил по охране труда при эксплуатации электроустановок при наличии превышения ПДУ требуется использование средств коллективной или индивидуальной защиты [39]. Экранирующие комплекты входят в норму бесплатной выдачи электротехническому персоналу, осуществляющему работы на ОРУ напряжением выше 220 кВ [28].

Результаты физиолого-гигиенической оценки функционального состояния организма добровольцев при применении СИЗ от ЭП ПЧ в производственных условиях с ТНС-индексом от $18,6 \pm 1,8^{\circ}\text{C}$ до $26,6 \pm 1,5^{\circ}\text{C}$ свидетельствуют о том, что применение СИЗ вносит существенный вклад в тепловую нагрузку среды.

Следовательно, при температуре окружающей среды выше 30°C использование СИЗ данного типа следует рассматривать как фактор повышенного риска развития теплового напряжения и перегрева организма.

На основании проведенной физиолого-гигиенической оценки теплового состояния организма добровольцев представляется целесообразным обосновать регламент труда и отдыха, направленный на профилактику перегрева и поддержание работоспособности персонала.

В условиях высокой температуры окружающей среды ($\geq 30^{\circ}\text{C}$) основным принципом обеспечения сохранения здоровья персонала может служить ограничение времени непрерывного пребывания в СИЗ с обязательным включением регламентированных перерывов для восстановления организма.

С учетом полученных данных для категории выполнения работ Па с общими энерготратами 113 Вт/м^2 оптимальной представляется следующая схема [25]:

- продолжительность непрерывной работы с использованием СИЗ не должна превышать 40 минут;

- продолжительность отдыха – не менее 20 минут;

Перерывы должны проводиться в специально оборудованных зонах отдыха с благоприятным микроклиматом:

- температура воздуха 20–24°C;
- наличие вентиляции или кондиционирования;
- возможность снятия СИЗ для восстановления теплообмена.

Обязательным элементом профилактики является организация адекватного питьевого режима, рекомендуется:

- прием жидкости в объеме 150 – 250 мл каждые 15–20 минут;
- использование охлажденных напитков (не ниже 10–12°C);
- при длительной работе - применение изотонических растворов для компенсации потерь электролитов.

Дополнительно следует учитывать индивидуальные особенности работников, включая уровень физической подготовки, состояние здоровья и акклиматизацию к тепловым условиям. Для лиц, не адаптированных к высокой температуре, продолжительность работы должна быть дополнительно сокращена.

Необходимо также предусмотреть систему медицинского контроля, включающую:

- мониторинг частоты сердечных сокращений;
- оценку субъективного теплового состояния;
- контроль признаков теплового стресса (головокружение, слабость, чрезмерное потоотделение или его прекращение).

При появлении признаков перегревания работа должна быть немедленно прекращена, а работник переведён в условия охлаждения с последующим медицинским осмотром.

Однако при увеличении энерготрат даже на 30–70% (до 150-200 Вт/м²), что является типичным при проведении обхода по территории ОРУ, подъеме

на конструкции, выполнении монтажных и ремонтных работ, может происходить резкое увеличение внутренней теплопродукции организма. В условиях использования СИЗ это может приводить к следующим эффектам: сдвигу теплового баланса в положительную сторону; более раннему достижению предельно допустимых показателей теплового состояния организма; ускоренному насыщению пододежного пространства влагой, что значительно замедляет процесс испарения пота и испарительную теплоотдачу; снижению эффективности восстановительных периодов, особенно при коротких перерывах.

При увеличении энерготрат необходимо:

- сокращать время непрерывной работы на 20–40%;
- увеличивать продолжительность отдыха на 25–50%;
- обеспечивать более интенсивное охлаждение (кондиционирование, активное охлаждение);
- усиливать медицинский контроль.

При переменной нагрузке (что характерно для реальных условий) рекомендуется ориентироваться на пиковые энерготраты, а не на средние значения за смену.

Таким образом, регламентация труда и отдыха при использовании СИЗ от ЭП ПЧ в условиях нагревающей среды в теплый период года должна носить строго нормированный характер и основываться на принципах профилактики теплового стресса. Игнорирование данных требований может привести к развитию перегрева организма, снижению работоспособности и повышению риска производственного травматизма.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Научное обоснование обеспечения сохранения здоровья работников, занятых обслуживанием и эксплуатацией электросетевых объектов в теплое время года, путем снижения воздействия ведущего производственного фактора, такого, как ЭП ПЧ, с использованием численных методов для оценки величины плотности наведенных токов в условиях экранирования и экспериментальных исследований на лабораторных животных позволило комплексно оценить эффективность мероприятий по снижению вредного действия ведущего производственного фактора (ЭП ПЧ) с учетом тепловой нагрузки среды и предложить регламент труда и отдыха для сохранения здоровья электротехнического персонала.

Проведенная гигиеническая оценка уровней ЭП и МП ПЧ на ОРУ напряжением 220-750 кВ показала превышение ПДУ по напряженности ЭП ПЧ на всех исследуемых объектах, наибольшие уровни которой достигали 30,8 кВ/м, что превышает максимальный ПДУ, при котором невозможно выполнение работ без использования СИЗ.

Превышение ПДУ индукции МП отмечено только на объекте 1 на ОРУ 220 и 500 кВ, причем наибольшие уровни индукции МП достигали 579,3 мкТл, однако на объекте 2 (ОРУ 330, 500 и 750 кВ) превышений ПДУ индукции МП отмечено не было, поэтому МП ПЧ может рассматриваться как эпизодический фактор, превышение которого не связано с классом напряжения объекта и определяется током рабочего напряжения и зависит исключительно от нагрузки.

В теплое время года на открытых территориях анализ динамики температуры и влажности пододежного пространства СИЗ указывает на то, что использование защитного экранирующего комплекта Эп-4(0) приводит к формированию замкнутого микроклимата под одеждой, характеризующегося повышением данных показателей в процессе выполнения работы. На объекте 2 отмечалось достоверное повышение температуры и влажности пододежного

пространства по сравнению с исходными значениями. Это приводило к затруднению испарения пота (потоотделению). Рост влажности пододежного пространства резко снижал эффективность потоотделения и приводил к накоплению избыточного тепла в организме и повышению риска перегревания. Данный эффект усиливается при использовании защитной одежды, ограничивающей конвекцию и испарение.

Динамика средневзвешенной температуры кожи свидетельствует о достоверном ее повышении в процессе выполнения работ на обоих объектах. При выполнении работ с допустимыми климатическими параметрами увеличение температуры кожи носило умеренный характер и не выходило за пределы физиологически допустимых значений, что указывает на сохранение эффективных механизмов терморегуляции при использовании СИЗ в допустимых климатических условиях. Величины теплонакопления (0,71–1,62 кДж/кг в рабочий период) оценивались как допустимые, что соответствует сохранению теплового баланса организма. При выполнении работ в климатических условиях, превышающих верхнюю границу допустимых значений отмечался более выраженный рост температуры кожи и к 40-ой минуте работы составлял 35,81°C, что превышает величины этого показателя (35,4°C), соответствующего верхней границе предельно допустимого теплового состояния человека на период не более 1 часа за рабочую смену и отражает значительное напряжение системы терморегуляции и увеличение тепловой нагрузки на организм, а также более выраженное увеличение теплосодержания (до 3,73 кДж/кг к 40-й минуте и 3,96 кДж/кг к 60-ой минуте). Это указывает на развитие положительного теплового баланса, при котором количество поступающей (или увеличение внутренней) тепловой энергии превышает количество теплоты, отдаваемой во внешнюю среду. Оценка риска перегревания организма по усредненному значению показателя теплонакопления $3,52 \pm 0,50$ кДж/кг за период работы, указывает на выраженное напряжение реакций терморегуляции, снижение справочных

данных физической работоспособности до 25%, снижение физической и умственной производительности труда до 27,9 и 22% соответственно [47].

Проведение исследования по оценке защитных свойств СИЗ в производственных условиях позволило подтвердить их защитные свойства применительно к определенным видам работ. Сопоставление результатов натурных и лабораторных испытаний, приближенных к натурным, по оценке защитных свойств СИЗ показало различие данных менее чем в 20%, что обосновывается погрешностью измерительного оборудования и указывает на адекватность и возможность моделирования производственных условий, что позволило уточнить методику оценки эффективности СИЗ.

Результаты математического моделирования и численной дозиметрии подтвердили эффективность защитных свойств СИЗ от ЭП ПЧ по величине наведенных токов, у фантомов крыс снижение плотности наведенных токов достигало двух порядков по сравнению с животными, подвергавшихся экспозиции 2-10 ПДУ (50 кВ/м).

Полученные данные численной дозиметрии в совокупности с литературными данными о потенциально негативном влиянии ЭП ПЧ на систему крови в экспериментальных исследованиях на животных послужили основанием для проведения экспериментальных исследований по изучению эффектов подострых воздействий ЭП ПЧ на систему крови и кроветворения экспериментальных животных с учетом возможных эффектов применения материалов, используемых в СИЗ.

При экспериментальном исследовании отдельных биологических эффектов ЭП ПЧ при снижении уровней ЭП ПЧ до уровней ниже ПДУ с использованием экранирующих материалов типовых образцов СИЗ обеспечивалось отсутствием выраженных биологических эффектов при плотности наведенных токов в желудке (9,27 и 0,095 мА/м²), селезенке (3,53 и 0,042 мА/м²), в крови (1,34 и 0,022 мА/м²) и костном мозге (0,75 и 0,012 мА/м²) в группе экспозиции 50 кВ/м и экранированной группе соответственно.

Результаты исследования резистентности эритроцитов методом кислотных эритрограмм выявили достоверное снижение общего времени кислотного гемолиза (10,7%) относительно двух других групп спустя 2 и 4 недели воздействия. После 4-х недель экспозиции общее время гемолиза в группах мнимой и экранированной экспозиции увеличилось на 30%.

Анализ показателей периферической крови животных показал достоверное снижение числа эритроцитов (3,6%) и лимфоцитов (20%) на фоне повышения содержания MID (моноциты, эозинофилы и базофилы) (38%) после 4 недель экспозиции в группе истинной экспозиции относительно других групп (мнимого воздействия и группы экранирования). Анализ остальных показателей крови выявил общий колебательный характер их изменений, который проявлялся только разнонаправленными тенденциями и не достигал статистически достоверного уровня.

Анализ результатов пункта костного мозга выявил увеличение числа миелоцитов (5%) и палочкоядерных нейтрофилов (5,8%) у животных группы истинной экспозиции относительно других групп спустя 4 недели эксперимента. Отмечено также повышенное лейкоэритробластическое отношение (18%) на фоне снижения содержания эозинофилов (5%), базофильных (11%) и оксифильных эритробластов (13%) на 4 неделе пребывания в ЭП ПЧ у крыс группы истинной экспозиции относительно животных двух других групп.

В совокупности, полученные результаты позволяют сделать вывод, что воздействие ЭП ПЧ напряженностью 50 кВ/м может вызывать не только изменения показателей периферической крови и функциональных свойств эритроцитов, но и затрагивает центральное звено кроветворения – костный мозг. Наблюдаемые сдвиги, по-видимому, отражают развитие адаптационно-компенсаторной перестройки гемопоэза, характеризующейся ускорением созревания клеток гранулоцитарного ряда, модификацией эритропоэза и изменением баланса между различными ростками кроветворения, а

использование СИЗ от ЭП ПЧ обеспечивает отсутствие данных изменений в системе крови и кроветворения.

Таким образом, результаты проведенных исследований по обеспечению снижения ЭП ПЧ как ведущего производственного фактора на рабочих местах электротехнического персонала, в том числе при оценке наведенных токов и выявленных в эксперименте биологических эффектов, при наличии сочетанного действия тепловой нагрузки среды позволяют научно обосновывать дополнительные требования по обеспечению сохранения здоровья электротехнического персонала, включая регламентацию труда и отдыха при выполнении работ в теплое время года с использованием СИЗ от ЭП ПЧ.

ВЫВОДЫ

1. Гигиеническая оценка уровней ЭП и МП ПЧ на рабочих местах электротехнического персонала электросетевых объектов напряжением 220-750 кВ показала превышение ПДУ за рабочую смену в 3-5 раз: на ОРУ 220 кВ – 17,8 кВ/м; на ОРУ 330 кВ – 14,4 кВ/м; на ОРУ 500 кВ – 19,4 кВ/м; на ОРУ 750 кВ – 27,9 кВ/м. Превышения ПДУ ЭП ПЧ на ОРУ 330-750 кВ отмечались от 57 до 80% всех территорий обследованных объектов электроэнергетики, что позволило опередить класс условий труда персонала как 3.1.

2. Физиолого-гигиеническая оценка теплового состояния организма добровольцев при использовании СИЗ от ЭП ПЧ при категории Па с энерготратами 113 кДж/кг на электросетевых объектах в условиях $23,8 \pm 1,0^{\circ}\text{C}$ (ТНС-индекс $17,9 \pm 1,7^{\circ}\text{C}$) показала, что влияние термической нагрузки среды компенсируется активацией механизма теплопотерь и накоплением влаги в пододежном пространстве при допустимых условиях окружающей среды, тогда как при $32,6 \pm 2,0^{\circ}\text{C}$ (ТНС-индекс $26,6 \pm 1,3^{\circ}\text{C}$) отмечалось достоверное увеличение теплонакопления ($3,52 \pm 0,50$ кДж/кг) за период работы, что позволяет определить класс условий труда как 3.2.

3. Полученный коэффициент экранирования в лабораторных условиях составил 84,7 – 71,8 дБ, тогда как на рабочем месте отмечалось снижение защитных свойств комплектов до 68,8 – 61,4 дБ, что обусловлено неоднородностью ЭП ПЧ. Поэтому в рамках обоснования требований к защитным свойствам СИЗ типа Эп-4(0) были предъявлены более строгие требования (коэффициент экранирования 60 дБ), которые вошли в утвержденный проект изменений ТР ТС 019/2011 (решение № 40 от 13.03.2026 г.).

4. Разработанные математические модели условий экспозиции ЭП ПЧ (50 кВ/м) без экранирования позволили оценить максимальные значения плотности наведенных токов в органах и тканях фантомов крыс: в желудке

(9,27 мА/м²), селезенке (3,53 мА/м²), в крови (1,34 мА/м²) и костном мозге (0,75 мА/м²). При экранировании фантомов животных отмечено снижение плотности наведенных токов в мышечной и нервной тканях, в костном мозге и гипофизе на порядок, а в селезенке, крови, желудке и поджелудочной железе на два порядка.

5. Оценка биологических эффектов ЭП ПЧ на лабораторных животных без экранирования показала, что подострое воздействие фактора приводят к достоверному снижению содержания лимфоцитов и увеличению эритроцитов, в том числе снижению резистентности мембран эритроцитов, при тенденции к изменению показателей костного мозга, что свидетельствует о развитии адаптационно-компенсаторной перестройки гемопоза. Экранирование при аналогичных условиях ЭП ПЧ обеспечивало отсутствие достоверных изменений тех же показателей у экспериментальных животных.

6. Результаты гигиенических, дозиметрических и экспериментальных исследований сочетанного действия ведущих производственных факторов (ЭП ПЧ и микроклимат для открытых территорий) на персонал объектов высокого и сверхвысокого напряжения позволили установить итоговый класс условий труда 3.2. Предложен и обоснован регламент труда и отдыха для сохранения здоровья электротехнического персонала: при температуре $\geq 30^{\circ}\text{C}$ продолжительность непрерывной работы с использованием СИЗ не должна превышать 40 минут с периодом отдыха – не менее 20 минут.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абрашова, Т.В. Справочник. Физиологические, биохимические и биометрические показатели нормы экспериментальных животных / Т.В. Абрашова [и др.]. — Санкт-Петербург: ЛЕМА, 2013. — 116 с.
2. Артюхов, В.Г. Биологические мембраны: структурная организация, функции, модификация физико-химическими агентами: учебное пособие / В.Г. Артюхов, М.А. Наквасина. — Воронеж: Издательство Воронежского государственного университета, 2000. — 296 с.
3. Асанова, Т.П. К вопросу о влиянии электрического поля высокого напряжения на организм работающих / Т.П. Асанова, А.Н. Раков, А.В. Щеглова // Матер. науч. сессии, посв. итогам работы Ленинградского института гигиены труда и профзаболеваний за 1961-1962 гг. — 1963. — С.52-54.
4. Асанова, Т.П. Состояние здоровья работающих в электрическом поле открытых распределительных устройств 400-500 кВ / Т.П. Асанова, А.Н. Раков // Гигиена труда и профзаболевания. — 1966. — №5. — С.50-51.
5. Бурмистрова, О.В. Физиолого-гигиеническое обоснование разработки методики оценки спецодежды работающих в нагревающей среде по показателям теплового состояния / О.В. Бурмистрова, Т.К. Лосик, Е.С. Шупорин // Гигиена труда и промышленная экология. — 2019. — Т. 59. — № 12. — С. 1013-1019.
6. Гигиена труда: учебник / Под ред. Н.Ф. Измерова, В. Ф. Кириллова. — М.: ГЭОТАР-Медиа, 2008. — 592 с.
7. ГОСТ 12.1.051-90 Система стандартов безопасности труда. Электробезопасность. Расстояния безопасности в охранной зоне линий электропередачи напряжением свыше 1000 В. — М.: Стандартинформ, 2009. — 4 с.
8. 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. – 42 с.

9. ГОСТ 1516.3-96 Электрооборудование переменного тока на напряжения от 1 до 750 кВ. Требования к электрической прочности изоляции. – М.: Госстандарт России, 1999. – 50 с.

10. ГОСТ 33044-2014 Принципы надлежащей лабораторной практики. – М.: Стандартинформ, 2019. – 12 с.

11. ГОСТ 34566-2019 «Комбикорма полнорационные для лабораторных животных. Технические условия»

12. ГОСТ Р 51232-98 Вода питьевая. Общие требования к организации и методам контроля качества. – М.: ГОССТАНДАРТ РОССИИ, 1999. – 21 с.

13. ГОСТ Р 57794-2017 (ИСО 7933:2004) Эргономика термальной среды. Аналитическое определение и интерпретация теплового стресса с использованием расчета прогнозируемой тепловой нагрузки. – М.: Стандартинформ, 2017. – 31 с.

14. ГОСТ Р ИСО 7243–2007 (ИСО 7243:1989). Термальная среда. Расчет тепловой нагрузки на работающего человека, основанный на показателе WBGT (температура влажного шарика психрометра). М.: Стандартинформ, 2008. 12 с.

15. ГОСТ Р ИСО 9886-2008. Эргономика термальной среды. Оценка температурной нагрузки на основе физиологических измерений. М.: Стандартинформ; 2009.

16. Гурвич, Е.Б. Смертность персонала, осуществляющего эксплуатацию энергообъектов напряжением 500 кВ / Е.Б. Гурвич, Э.А. Новохатская, Н.Б. Рубцова // Медицина труда. – 1995. – №10. – С.18-21.

17. Данилин, В.А. Состояние здоровья у работающих в электрическом поле высокого напряжения / В.А. Данилин, А.К. Воронин, В.А. Мадорский // Гигиена труда и профзаболевания. – 1969. – №5. – С.51-52.

18. Карпищенко, А.И. Медицинские лабораторные технологии. Справочник / Под ред. проф. А.И. Карпищенко. Том 1 – СПб.: Интермедика, – 2002. – 408 с.
19. Колечицкий, Е.С. Защита персонала энергообъектов от воздействия электрических полей промышленной частоты / Е.С. Колечицкий, И.В. Королев, Д.А. Бурдюков [и др.] // Электротехника.
20. Коньшина, Т.А. Научное обоснование комплексного метода гигиенической оценки средств индивидуальной защиты от электрических полей промышленной частоты / Т.А. Коньшина. Дис. канд. биол. наук. – М., 2021. – 151 с.
21. Коробкова, В.П. Влияние электрического поля на подстанциях 500 и 750 кВ на бригады обслуживания и средства их защиты / В.П. Коробкова, Ю.А. Морозов, М.Д. Столяров. Доклад СИГРЭ – ИК, 1972.
22. Королев, И.В. Разработка методов и средств, снижающих воздействие электрических полей промышленной частоты на человека / И.В. Королев. Дис. канд. технич. наук. – М., 2011. – 131 с.
23. Кудряшов, Ю.Б. Радиационная биофизика: радиочастотные и микроволновые электромагнитные излучения / Ю.Б. Кудряшов, Ю.Ф. Перов, А.Б. Рубин. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. – 184 с
24. Мисриханов М.Ш. Обеспечение электромагнитной безопасности электросетевых объектов / М.Ш. Мисриханов, Н.Б. Рубцова, А.Ю. Токарский. – М.: Наука, 2010. – 870 с.
25. МР 2.2.8.0017-10 Режимы труда и отдыха работающих в нагревающем микроклимате в производственном помещении и на открытой местности в теплой период года: Методические рекомендации. – М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2011. – 19 с.
26. МУК 4.3.1895-04 Оценка теплового состояния человека с целью обоснования гигиенических требований к микроклимату рабочих мест и мерам профилактики охлаждения и перегревания. – М.: Федеральный центр госсанэпиднадзора Минздрава России, 2004. – 20 с.

27. МУК 4.3.2491-09 Гигиеническая оценка электрических и магнитных полей промышленной частоты (50 Гц) в производственных условиях. – М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2009. – 24 с.

28. Об утверждении Единых типовых норм выдачи средств индивидуальной защиты и смывающих средств: Приказ Министерства труда и социальной защиты Российской Федерации от 29.10.2021 № 767н. [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/727092797> (Дата обращения 16.02.2026).

29. Павлова, Т.В. Влияние теплового стресса на физическую и психическую работоспособность в экстремальных ситуациях / Т.В. Павлова, В.А. Марковская // Проблемы правоохранительной деятельности. — 2017. — № 4. — С. 34–38.

30. Перов, С.Ю. Влияние термической нагрузки среды на электротехнический персонал, использующий экранирующие средства индивидуальной защиты на открытых территориях в тёплый период года / С.Ю. Перов, М.В. Сажина, Т.А. Коньшина // Медицина труда и промышленная экология. — 2023. — Т. 63, № 2. — С. 109–115.

31. Перов, С.Ю. Гигиеническая оценка уровней электрических и магнитных полей в зоне прохождения воздушных линий электропередачи 500 и 750 кВ / С.Ю. Перов, А.Е. Калачева, В.В. Журов // Профилактическая медицина-2023 : сборник научных трудов всероссийской научно-практической конференции с международным участием (Санкт-Петербург, 15–16 ноября 2023 года). — Санкт-Петербург : ФГБОУ ВО «Северо-Западный государственный медицинский университет имени И. И. Мечникова» Минздрава РФ, 2023. — С. 217–221.

32. Перов, С.Ю. Оценка плотности индуцированных токов в органах человека, находящегося в зоне прохождения воздушных линий электропередачи / С.Ю. Перов, В.С. Орлова, В.В. Журов // Вестник

Российского университета дружбы народов. Серия: Экология и безопасность жизнедеятельности. — 2025. — Т. 33, № 1. — С. 57–67.

33. Перов, С.Ю. Оценка теплового состояния организма человека при работах на открытых распределительных устройствах напряжением 500 кВ / С.Ю. Перов, М.В. Сажина, Т.А. Коньшина // Здоровье и окружающая среда : сборник материалов международной научно-практической конференции, посвящённой 95-летию РУП «Научно-практический центр гигиены» (Минск, 24–25 ноября 2022 года). — Минск: Издательский центр БГУ, 2022. — С. 308–309.

34. Перов, С.Ю. Оценка электрических полей промышленной частоты и наведенного напряжения на рабочих местах электротехнического персонала железной дороги / Перов С.Ю., Рубцова Н.Б., Макарова-Землянская Е.Н. // Здоровье и окружающая среда: материалы международной научно-практической конференции. – Минск. – 2019. – с.147-148.

35. Перов, С.Ю. Условия труда электротехнического персонала при использовании экранирующих комплектов в тёплое время года. / С.Ю. Перов, О.В. Бурмистрова, А.И. Дремин // Гигиена и санитария. – 2025; – Т.104. – №4. — С. 403–408.

36. Перов, С.Ю. Физиолого-гигиеническая оценка условий труда электротехнического персонала при использовании средств индивидуальной защиты в теплое время года / С.Ю. Перов, О.В. Бурмистрова, А.И. Дремин // Сборник трудов всероссийской научной конференции с международным участием «медицина труда: проблемы сохранения профессионального здоровья в России на рубеже первой и второй четверти XXI века». - СПб.: ФГБОУ ВО СЗГМУ им. И.И. Мечникова Минздрава России, - 2024. - С. 197-200.

37. Перов, С.Ю. Эколого-гигиеническая оценка электрических и магнитных полей промышленной частоты вблизи воздушных линий электропередачи / С.Ю. Перов, В.В. Журов // Сборник трудов всероссийской научной конференции с международным участием, посвященной 100-летию

со дня основания кафедры медицины труда ФГБОУ ВО СЗГМУ им. И.И. Мечникова Минздрава России. — СПб., 2024. — С. 200–202.

38. Постановление Главного государственного санитарный врач Российской Федерации N 40 от 2 декабря 2020 года. Об утверждении санитарных правил СП 2.2.3670-20 «Санитарно-эпидемиологические требования к условиям труда». (зарегистрировано Министерством юстиции Российской Федерации 29 декабря 2020 г., регистрационный N61893). [Электронный ресурс]. URL: https://www.rosпотребнадзор.ru/files/news/SP2.2.3670-20_trud.pdf (Дата обращения 23.06.2023).

39. Правила по охране труда при эксплуатации электроустановок. Утв. Приказом Минтруда России №903н от 15.12.2020.

40. Р 2.2.2006-05 Руководство по гигиенической оценке факторов рабочей среды и трудового процесса. Критерии и классификация условий труда. Утв. Главным Государственным Санитарным Врачом РФ 29.07.2005.

41. РД-АПК 3.10.07.02-09 Методические рекомендации по содержанию лабораторных животных в вивариях научно-исследовательских институтов и учебных заведений. – М.: Министерство сельского хозяйства российской федерации, 2009. – 29 с.

42. Результаты специальной оценки условия труда – ПАО «Россети» [Электронный ресурс]. URL: <https://rosseti.ru/career/labor-protection/results-of-a-special-assessment-of-working-conditions/> (Дата обращения 17.02.2026).

43. Рубцова, Н.Б. Безопасность персонала электросетевых объектов при применении средств индивидуальной защиты от электрических полей промышленной частоты / Н.Б. Рубцова, С.Ю. Перов, И.А. Чернов [и др.] // Безопасность в техносфере. – 2018. – Т.7. – №2. – С.35-41.

44. Рубцова, Н.Б. Методические принципы гигиенической оценки электромагнитных полей промышленной частоты на рабочих местах персонала электросетевых объектов и их реализация / Н.Б. Рубцова, А.Ю.

Токарский, Н.В. Лазаренко [и др.] // Бюллетень Восточно-Сибирского научного центра Сибирского отделения РАМН. – 2006. – №3. – С.7-12.

45. Рубцова, Н.Б. Физиолого-гигиенические принципы сохранения здоровья человека в условиях производственных воздействий электромагнитных полей промышленной частоты / Н.Б. Рубцова. Дис. д-ра биологич. наук. – М., 1997. – 280 с.

46. Рубцова, Н.Б. Электромагнитные поля физиотерапевтического оборудования как источник потенциальной опасности для медицинского персонала / Н.Б. Рубцова, Д.В. Марков, А.Н. Шеина // Физиотерапия, бальнеология и реабилитация. – 2012. – № 4. – С.48-54.

47. Руководство по оценке профессионального риска для здоровья работников. Организационно-методические основы, принципы и критерии оценки: Руководство. - М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2023. - 95 с.

48. СанПиН 1.2.3685-21 Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания. – М.: Центрмаг, 2021. – 736 с.

49. СанПиН 2.2.1/2.1.1.1200-03 Санитарно-защитные зоны и санитарная классификация предприятий, сооружений и иных объектов. – М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2008. – 55 с.

50. СанПиН 2.2.4.548-96 Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений: Санитарные правила и нормы. – М.: Информационно-издательский центр Минздрава России. 2001. – 20 с.

51. Стародубцева, М.Н. Индуцированные низкочастотным электромагнитным полем наномасштабные изменения структуры и механических свойств поверхности форменных элементов крови / М.Н. Стародубцева // Молекулярные, мембранные и клеточные основы функционирования биосистем : тезисы докладов международной научной конференции, Четырнадцатого съезда Белорусского общества фотобиологов и биофизиков (Минск, 17–19 июня 2020 г.). — Минск: БГУ, 2020. — С. 91.

52. Тихонова, Г.И. Опыт проведения эпидемиологических исследований онкоопасности электромагнитных полей в Российской Федерации / Г.И. Тихонова, Н.Б. Рубцова // Медицина труда и промышленная экология. – 2020. – Т.60. – №9. – С.587-591.

53. Тихонова, Г.И. Отдаленные эффекты производственных и внепроизводственных воздействий электромагнитных полей промышленной частоты. Эпидемиологические исследования / Г.И. Тихонова, Н.Б. Рубцова, Э.А. Новохатская, А.В. Тихонов // Радиационная биология. Радиоэкология. – 2003. – №5. – С.555-558.

54. Тяжелова, В.Г. Проблема определения эквивалентных интенсивностей хронических электромагнитных облучений человека и лабораторных животных / В.Г. Тяжелова, В.В. Тяжелов, И.Г. Акоев // Известия Академии наук СССР. Серия биологическая. — 1984. — № 3. — С. 418–427.

55. Фатхутдинова, Л.М. Эпидемиологическое исследование влияния работы с источниками электромагнитных полей сверхнизкой частоты на развитие сердечно-сосудистой патологии / Л.М. Фатхутдинова, Р.Р. Залялов, З.М. Берхеева [и др.] // Казанский медицинский журнал. – 2005. – Т.86. – №4. – С. 284-288.

56. A psychobiological study of rhesus monkeys exposed to extremely low-frequency low-intensity magnetic fields / J. De Lorge. — Springfield, VA : National Technical Information Service, 1974. — (USN Report NAMRL-1203; NTIS № AD A000078).

57. Ambient factors in the workplace / ILO, 2001. [Электронный ресурс]. URL: https://www.ilo.org/global/topics/safety-and-health-at-work/normative-instruments/code-of-practice/WCMS_107729/lang--en/index.htm (дата обращения 05.05.2023)

58. Arnetz, B.B. Environmental illness: Multiple chemical sensitivity, sick building syndrome, electric and magnetic field disease / B.B. Arnetz // The Environment and Mental Health: A Guide for Clinicians / ed. by A. Lundberg. — New York: Routledge, 2013. — P. 115–146.

59. Bat-Erdene, B. Method of calculation of low-frequency electromagnetic field around 15 kV transmission lines / B. Bat-Erdene, M. Battulga, G. Tuvshinzaya // IEEE International Conference on Power and Energy. – 2020. – P.40-43.
60. Bates, G.P. Sweat rate and sodium loss during work in the heat / G.P. Bates, V.S. Miller // Journal of Occupational Medicine and Toxicology. — 2008. — Vol. 3, № 4.
61. Biologic Effects and Health Hazards of Microwave Radiation: Proceedings of an International Symposium, Warsaw, 15–18 October, 1973 / Sponsored by the World Health Organization, the US Department of Health, Education and Welfare, and the Scientific Council to the Minister of Health and Social Welfare, Poland. – Warsaw: Polish Medical Publishers, 1974. – 350 p
62. Bouchama, A. Heat stroke / A. Bouchama, J.P. Knochel // The New England Journal of Medicine. — 2002. — Vol. 346, № 25. — P. 1978–1988.
63. Bracken, T.D. Field measurements and calculations of electrostatic effects of overhead transmission lines / T.D Bracken // IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems. – 1976. – Vol.95. – N.2. – P.494-504.
64. Brearley, M. Working in Hot Conditions—A Study of Electrical Utility Workers in the Northern Territory of Australia / M. Brearley, P. Harrington, D. Lee [et al.] // Journal of Occupational and Environmental Hygiene. — 2015. — Vol. 12. — P. 156–162. — doi: 10.1080/15459624.2014.957831.
65. Brouns, F. Heat-sweat-dehydration-rehydration: a praxis oriented approach / F. Brouns // Journal of Sports Sciences. — 1991. — Vol. 9. — P. 143–152.
66. BS 7963:2000 Ergonomics of the thermal environment – Guide to the assessment of heat strain in workers wearing personal protective equipment. – 2000. p.28 [Электронный ресурс]. URL: <https://www.en-standard.eu/bs-7963-2000-ergonomics-of-the-thermal-environment-guide-to-the-assessment-of-heat-strain-in-workers-wearing-personal-protective-equipment/> (дата обращения 23.06.2023).

67. Chen, X.L. Low Frequency Electromagnetic Field Exposure Study with Posable Human Body Model / X.L. Chen, S. Benkler, C.H. Li [et al.] // IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility. — 2010. — P. 702–705.
68. Corpinen, L., Partanen, J. (1999). Cardiovascular Effects of Short-Term Exposure to Fields of Electricity Power Transmission. In: Bersani, F. (eds) *Electricity and Magnetism in Biology and Medicine*. Springer, Boston, MA.
69. Crandall, C.G. Human cardiovascular responses to passive heat stress / C.G. Crandall, T.E. Wilson // *Comprehensive Physiology*. — 2015. — Vol. 5, № 1. — P. 17–43.
70. Dawson, T.W. A comparison of 60 Hz uniform magnetic and electric induction in the human body / T.W. Dawson, K. Caputa, M.A. Stuchly // *Physics in Medicine and Biology*. — 1997. — Vol. 42, No. 12. — P. 2319–2339.
71. Di, G. A comparative study on effects of static electric field and power frequency electric field on hematology in mice / G. Di, X. Gu, Q. Lin [et al.] // *Ecotoxicology and Environmental Safety*. — 2018. — Vol. 166. — P. 109–115.
72. Directive 2013/35/EU of 26 June 2013 on the minimum health and safety requirements regarding the exposure of workers to the risks arising from physical agents (electromagnetic fields) // *Official Journal of the European Union*, L179. — 2013. — Vol. 56. — P. 1–21.
73. El Nahas, S.M. Micronuclei Formation in Somatic Cells of Mice Exposed to 50-Hz Electric Fields / S. M. El Nahas, H. A. Oraby // *Environmental and Molecular Mutagenesis*. — 1989. — Vol. 13. — P. 107–111.
74. El-Kaliuoby, M.I. Monitoring of rat's blood rheology after exposure to 50-Hz electric fields (occupational study) / M.I. El-Kaliuoby, A.M. El-Khatib, M.M. Mohamed [et al.] // *IOSR J Environ Sci Toxicol Food Technol*. — 2016. — Vol. 10, No. 4. — P. 4–8.
75. Ely, B.R. Hypohydration and acute thermal stress affect mood state but not cognition or dynamic postural balance / B.R. Ely, K.J. Sollanek, S.N. Cheuvront

[et al.] // European Journal of Applied Physiology. — 2013. — Vol. 113. — P. 1027–1034.

76. Environmental Health Criteria 238: Extremely Low Frequency Fields. — Geneva: World Health Organization, 2007. — 441 p.

77. Establishing a dialogue on risks from electromagnetic fields. World Health Organization, 2002. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.who.int/publications/i/item/9241545712> (Дата обращения 26.02.2026).

78. Fam, W.Z. Long-term biological effects of very intense 60 Hz electric field on mice / W. Z. Fam // IEEE Transactions on Biomedical Engineering. — 1980. — Vol. BME-27. — P. 376–381.

79. Fam, W.Z. Biological effects of 60-Hz magnetic field on mice / W.Z. Fam // IEEE Transactions on Magnetics. — 1981. — Vol. 17, № 4. — P. 1510–1513.

80. Farahat, S.A. Cardio-protective role of heat shock protein 70 (HSP 70) among heat-exposed workers / S.A. Farahat, A.M. Samir, D.A. Shaker [et al.] // Egyptian Journal of Occupational Medicine. — 2010. — Vol. 34, № 1. — P. 29–42.

81. Fereidouni, A. Human body modeling in the vicinity of high voltage transmission lines / A. Fereidouni, B. Vahidi, F. Shishehgar [et al.] // Science International (Lahore). — 2014. — Vol. 26, No. 3. — P. 1017–1031.

82. Fole, F.F. Effet Pas dams les sous-stations electriques / F.F. Fole // 2nd International Colloquium on the Prevention of Occupational Risks due to Electricity. — 1972.

83. Fole, F.F. New contribution to the study of electromagnetic fields generated by high voltages / F.F. Fole, F.G. Martinez, E. Dutrus // ASS Symposium. English translation in Technical Memorandum E8180-1 by IIT Research Institute for Electric Power Research Institute. — 1974.

84. Fujii, N. Comparison of hyperthermic hyperpnea elicited during rest and submaximal, moderate-intensity exercise / N. Fujii, Y. Honda, K. Hayashi // Journal of Applied Physiology. — 2008. — Vol. 104, № 4. — P. 998–1005.

85. Gagnon, D. Plasma hyperosmolality attenuates skin sympathetic nerve activity during passive heat stress in humans / D. Gagnon, S. A. Romero, H. Ngo [et al.] // *The Journal of Physiology*. — 2016. — Vol. 594. — P. 497–506.
86. Gisolfi, C.V, Temperature regulation during exercise: old concepts, new ideas / C.V. Gisolfi, C.B. Wenger // *Exercise and Sport Sciences Reviews*. — 1984. — Vol. 12. — P. 339–372.
87. Gorman, A.J., Mechanisms producing tachycardia in conscious baboons during environmental heat stress / A.J. Gorman, D.W. Proppe // *Journal of Applied Physiology*. — 1984. — Vol. 56, № 2. — P. 441–446.
88. Graves, H.B. Biological effects of 60-Hz alternating-current fields: a Cheshire cat phenomenon / H.B. Graves, P.D. Long, D.T. Poznaniak // *Biological effects of extremely-low-frequency electromagnetic fields: proceedings of the 18th Annual Hanford Life Sciences Symposium* / ed. by R. D. Phillips. — Springfield, VA: National Technical Information Service, 1979. — P. 184–197.
89. Grebeneva, O.V. Evaluating Occupational Morbidity Among Energy Enterprise Employees In Industrial Region Of Kazakhstan / O.V. Grebeneva, D.H. Rybalkina, L.K. Ibrayeva [et al.] // *Russian Open Medical Journal*. — 2021. — Vol. 10, № 3.
90. Guidelines for limiting exposure to electromagnetic fields (100 kHz–300 GHz). — ICNIRP, 2020.
91. Havenith, G. Heat balance when wearing protective clothing / G. Havenith // *The Annals of Occupational Hygiene*. — 1999. — Vol. 43, № 5. — P. 289–296.
92. Hayashi, K. Relationship between ventilatory response and body temperature during prolonged submaximal exercise / K. Hayashi, Y. Honda, T. Ogawa [et al.] // *Journal of Applied Physiology*. - 2006. - Vol. 100. - P. 414–420.
93. Hayashi, K. The effect of CO₂ on the ventilatory sensitivity to rising body temperature during exercise / K. Hayashi, Y. Honda, N. Miyakawa [et al.] // *Journal of Applied Physiology*. - 2011. - Vol. 110. - P. 1334–1341.

94. Hirata, A. Induced electric fields and current densities in organs of a human body model exposed to ELF vertical electric fields / A. Hirata, K. Caputa, T.W. Dawson // *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*. — 2001. — Vol. 48, No. 4. — P. 442–453.
95. Hori, T. Characterization of the suppressive effects of extremely-low-frequency electric fields on a stress-induced increase in the plasma glucocorticoid level in mice / T. Hori, T. Nedachi, H. Suzuki [et al.] // *Bioelectromagnetics*. — 2018. — Vol.39. — N.7. — P.516-528.
96. Hosseinabadi, M.B. DNA damage from long-term occupational exposure to extremely low frequency electromagnetic fields among power plant workers / M.B. Hosseinabadi, N. Khanjani, M. Mirzaii [et al.] // *Mutation Research/Genetic Toxicology Environmental Mutagenesis*. — 2019. — Vol.846. — 403079.
97. Hosseinabadi, M.B. Effect of long-term occupational exposure to extremely low frequency electromagnetic fields on proinflammatory cytokine and hematological parameters / M.B. Hosseinabadi, N. Khanjani, E. Samaei, F. Nazarkhani // *International Journal of Radiation Biology*. — 2019. — Vol.95. — N.11. — P.1573-1580.
98. Hosseinabadi, M.B. The effect of chronic exposure to extremely low-frequency electromagnetic fields on sleep quality, stress, depression and anxiety / M.B. Hosseinabadi, N. Khanjani, M.H. Ebrahimi, [et al.] // *Electromagnetic Biology and Medicine*. — 2019. — Vol.38. — N.1. — P.96-101.
99. Hosseinabadi, M.B. The effect of extremely low-frequency electromagnetic fields on the prevalence of musculoskeletal disorders and the role of oxidative stress / M.B. Hosseinabadi, N. Khanjani // *Bioelectromagnetics*. — 2019. — Vol.40. — N.5. — P.354-360.
100. IARC Monographs, Volume 80: Non-Ionizing Radiation, Part 1: Static and Extremely Low-Frequency (ELF) Electric and Magnetic Fields. — Lyon : International Agency for Research on Cancer, 2002. — 429 p.

101. ICNIRP Guidelines for limiting exposure to time-varying electric and magnetic fields (1 Hz to 100 kHz). *Health Physics*. – 2010. – Vol.99. – N.6. – P.818–836.
102. ICNIRP Guidelines for limiting exposure to time-varying electric and magnetic fields (1 Hz to 100 kHz). *Health Physics*. – 2010. – Vol.99. – N.6. – P.818–836.
103. IEC 60895-2020 Live working – Conductive clothing. CEN-CENELEC, 2020. – 70 p.
104. IEEE 644-2019 Standard Procedures for Measurement of Power Frequency Electric and Magnetic Fields from AC Power Lines. IEEE SA Standards Board, 2019. – 39 p.
105. Jingyi, E. Research Report on the effect of high voltage field intensity on the human body (Stages I and 11) / E. Jingyi, W. Fanghua // Sheyang Municipality Vocational Disease Prevention and Treatment Hospital, and the Technology Innovation Bureau of Northwest Power Administration. – 1980.
106. Karimi, S.A. Effects of exposure to extremely low-frequency electromagnetic fields on spatial and passive avoidance learning and memory, anxiety-like behavior and oxidative stress in male rats / S.A. Karimi, I. Salehi, T. Shykhi [et al.] // *Behavioural Brain Research*. – 2019. – Vol.359. – P.630-638.
107. Kaune, W.T. Coupling of living organisms to ELF electric and magnetic fields / W.T. Kaune // *Biological and Human Health Effects of Extremely Low Frequency Electromagnetic Fields*. – Arlington, VA: American Institute of Biological Sciences, 1985. – P.25-60.
108. King, R.W.P. A review of analytically determined electric fields and currents induced in the human body when exposed to 50-60-Hz electromagnetic fields / R. W. P. King // *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. — 2004. — Vol. 52, № 5. — P. 1186–1192.
109. Korpinen, L.H. Occupational exposure to electric fields and induced currents associated with 400 kV substation tasks from different service platforms /

L.H. Korpinen, J.A. Elovaara, H.A. Kuisti // *Bioelectromagnetics*. — 2011. — Vol. 32, № 1. — P. 79–83.

110. Kulkarni, G.A. Numerical calculation of internal induced fields in humans due to high voltage transmission lines / G.A. Kulkarni, W.Z. Gandhare // *Acta Electrotechnica et Informatica*. — 2014. — Vol. 14, № 3. — P. 22–27.

111. Laakso, I. Modeling and Measurement of Exposure to Realistic Non-Uniform Electric Fields at 50 Hz / I. Laakso, T. Lehtinen // 2019 Joint International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC Sapporo) and Asia-Pacific International Symposium on Electromagnetic Compatibility (APEMC) (Sapporo, Japan, 2019). — P. 334–337.

112. Lai, J. Effects of 100- μ T extremely low frequency electromagnetic fields exposure on hematograms and blood chemistry in rats / J. Lai, Y. Zhang, J. Zhang [et al.] // *Journal of Radiation Research*. — 2016. — Vol. 57, № 1. — P. 16–24.

113. Li, N. Measurement of Electric Fields Around a 1000-kV UHV Substation / N. Li, X. Yang, Z. Peng // *IEEE Transactions on Power Delivery*. — 2013. — Vol. 28, № 4. — P. 2356–2362. — doi: 10.1109/TPWRD.2013.2269146.

114. Maeda, N. Erythrocyte rheology and oxygen transfer in microcirculatory system / N. Maeda // *J Biorheol*. — 2015. — Vol. 29, No. 1. — P. 2–5.

115. Masento, N.A. Effects of hydration status on cognitive performance and mood / N.A. Masento, M. Golightly, D.T. Field [et al.] // *British Journal of Nutrition*. — 2014. — Vol. 111. — P. 1841–1852.

116. Miller, M.W. Extremely low frequency (ELF) electric fields: experimental work on biological effects / M.W. Miller, C. Polk, E. Postow // *CRC Handbook of biological effects of electromagnetic fields*. — CRC Press, 2019. — P. 139–168.

117. Modolo, J. Human exposure to power frequency magnetic fields up to 7.6 mT: An integrated EEG/fMRI study / J. Modolo, A.W. Thomas, A. Legros // *Bioelectromagnetics*. — 2017. — Vol. 38, № 7. — P. 425–435.

118. Nafziger, J. Investigation of the effects of 50 Hz magnetic fields on purified human hematopoietic progenitors / J. Nafziger, L. Devevey, V. Tricottet [et al.] // *Life Sciences*. — 1997. — Vol. 61, No. 19. — P. 1935–1946.

119. National Emphasis Program – Outdoor and Indoor Heat-Related Hazards [Электронный ресурс] : OSHA Instruction. Directive Number: CPL 03-00-024 / Occupational Safety and Health Administration. — Published: 04.08.2022. — Режим доступа: <https://www.osha.gov/enforcement/directives/cpl-03-00-024>, свободный. — Загл. с экрана. — (Дата обращения: 06.02.2026).

120. Naval Aerospace Medical Research Laboratory: Exposure of man 10 magnetic fields alternating at extremely low frequency by D.E. Beischer, J.D. Grissett and R.R. Mitchell. (USN Report No. NAMRL-1180). Pensacola, FL: Naval Aerospace Medical Research Laboratory, 1973.

121. Pancardo, P. Real-time personalized monitoring to estimate occupational heat stress in ambient assisted working / P. Pancardo, F.D. Acosta, J.A. Hernández-Nolasco [et al.] // *Sensors*. – 2015. – Vol.15. – N.7. – P.16956-16980.

122. Pang, XF. The Influences of Electromagnetic Field Irradiated by High Voltage Transmission Lines with 50 Hz on the Features of Blood in Animals / X.F. Pang, G. Li // *Journal of Tissue Science and Engineering*. — 2017. — Vol. 8, № 1. — P. 1–10.

123. Perov, S. Two Test Methods Comparison for Power Frequency Electric Field Shielding Materials Evaluation / S. Perov, O. Belaya, T. Konshina [et al.] // *Proceedings of the 21st International Symposium on High Voltage Engineering*. — 2020. — P. 138–144.

124. Piil, J.F. Performance in complex motor tasks deteriorates in hyperthermic humans / J.F. Piil, J. Lundbye-Jensen, S.J. Trangmar [et al.] // *Temperature*. — 2017. — № 4. — P. 420–428.

125. Rachidi, F. Electromagnetic field interaction with transmission lines: From classical theory to HF radiation effects / F. Rachidi, S. Tkachenko // WIT Press: Southampton, 2008. – 257 p.

126. Ragan, H.A. Clinical pathologic evaluations in rats and mice chronically exposed 60-Hz electric fields / H.A. Ragan, M.J. Pipes, W.T. Kaune [et al.] // Biological effects of extremely-low-frequency electromagnetic fields : proceedings of the 18th Annual Hanford Life Sciences Symposium / ed. by R. D. Phillips [et al.]. — Springfield, VA : National Technical Information Service, 1979. — P. 297–325.

127. Ragan, H.A. Hematologic and serum chemistry studies in rats and mice exposed to 60-Hz electric fields / H.A. Ragan, R.L. Buschbom, M.J. Pipes [et al.] // Bioelectromagnetics. — 1983. — Vol. 4, № 1. — P. 79–90.

128. Raj, A.A. Protection against EMF at transmission line and tower / A.A. Raj, L. C. Ping, M.F. Sidek // IEEE International Conference on Power and Energy. — 2020. — P.376-381.

129. Reipert, B. M. Apoptosis in haemopoietic progenitor cells exposed to extremely low-frequency magnetic fields / B. M. Reipert, D. Allan, S. Reipert [et al.] // Life Sciences. — 1997. — Vol. 61, No. 16. — P. 1571–1582.

130. Rodahl, K. Occupational health conditions in extreme environments / K. Rodahl // Annals of Occupational Hygiene. — 2003. — Vol. 47, № 3. — P. 241–252.

131. Safigianni, A. S. Electric and Magnetic Field Measurements in a High Voltage Center / A. S. Safigianni, A. I. Spyridopoulos, V. L. Kanas // The Annals of Occupational Hygiene. — 2012. — Vol. 56, Iss. 1. — P. 18–24.

132. Sahu, S. Heat exposure, cardiovascular stress and work productivity in rice harvesters in India: implications for a climate change future / S. Sahu, M. Sett, T. Kjellstrom // Industrial Health. — 2013. — Vol. 51. — P. 424–431.

133. Sander, R. Laboratory studies on animals and human beings exposed to 50-Hz electric and magnetic fields / R. Sander, J. Brinkmann, B. Kuhne // International Conference on Large High Voltage Electrical Systems (CIGRE). — Paris: CIGRE, 1982.

134. Şenol, N. Evaluation of the Effects of a 50 Hz Electric Field on Brain Tissue by Immunohistochemical Method, and on Blood Tissue by Biochemical,

Physiological and Comet Method / N. Şenol, E. Kaya, Ö. Coşkun [et al.] // *Applied Sciences*. — 2023. — Vol. 13, № 5. — Art. 3276.

135. Seto Y.J. Chronic 60-Hz electric field exposure-induced subtle bioeffects on hematology / Y.J. Seto, D. Majeau-Chargois, J.R. Lymangrover [et al.] // *Environmental Research*. — 1986. — Vol. 39. — P. 143–152.

136. Smallcombe, J.W. Quantifying the impact of heat on human physical work capacity; part IV: interactions between work duration and heat stress severity / J.W. Smallcombe, J. Foster, S.G. Hodder [et al.] // *International Journal of Biometeorology*. — 2022. — Vol. 66. — P. 2463–2476.

137. Szuba, M. Evaluation of reports on environmental measurements of electromagnetic fields generated by high voltage transmission lines and substations / M. Szuba // *Medycyna Pracy*. — 2007. — T. 58, № 2. — C. 169–175.

138. Tarakhovsky, M.L., Effects of constant and variable magnetic fields on some indices of physiological function and metabolic processes in albino rats / M.L. Tarakhovsky, Y.P. Sambroskaya, B.M. Medvedev [et al.] // *Fiziologicheskii Zhurnal (Kiev)*. — 1971. — Vol. 17. — P. 452–459. — (English translation: Joint Publications Research Service, Arlington, VA, № 62865).

139. Tenforde, T.S. Interactions of ELF magnetic fields with living matter / T.S. Tenforde // *CRC Handbook of Biological Effects of Electromagnetic Fields*, 1986. — P.197-225.

140. Teyeme, Y. A review of contemporary techniques for measuring ergonomic wear comfort of protective and sport clothing / Y. Teyeme, B. Malengier, T. Tesfaye [et al.] // *AUTEX Research Journal*. — 2021. — Vol. 21, № 1. — P. 32–44.

141. The Foundation for Research on Information Technologies in Society (IT'IS). Big Male Rat V1.0 Posable. [Электронный ресурс]. URL: <https://itis.swiss/virtual-population/animal-models/animals/male-sprague-dawley-rat-567g-3/big-male-rat-v1-2> (дата обращения: 26.08.2026). DOI: 10.13099/VIP91101-01-1.

142. The Foundation for Research on Information Technologies in Society (IT'IS). Tissue Parameters Database Summary. [Электронный ресурс]. URL: <https://itis.swiss/virtual-population/tissue-properties/database/database-summary> (Дата обращения 06.12.2025).

143. Tiwari, R. Epinephrine, DNA integrity and oxidative stress in workers exposed to extremely low-frequency electromagnetic fields (ELF-EMFs) at 132 kV substations / R. Tiwari, N.K. Lakshmi, S.C. Bhargava, Y.R. Ahuja // *Electromagnetic Biology and Medicine*. – 2015. – Vol.34. – N.1. – P.56-62.

144. Tiwari, R. The potential bioeffects of extremely low frequency electromagnetic fields on melatonin levels & related oxidative stress in electric utility workers exposed to 132 kv substation / R. Tiwari, S.C. Bhargava, Y.R. Ahuja // *Journal of Electromagnetic Analysis and Applications*. – 2013. – Vol.5. – N.11. – P.393-403.

145. Tomruk, A. Occupational Exposure to High-level Electric Fields and Mechanistic Effects of External Supplements / A. Tomruk, E.O. Buyukatalay, U. Kaya [et al.] // *Research Square*. — 2022. — № rs-1593061/v1.

146. Touitou, Y. Long-term (up to 20years) effects of 50-Hz magnetic field exposure on blood chemistry parameters in healthy men / Y. Touitou, Y. Djeridane, J. Lambrozo [et al.] // *Clinical Biochemistry*. — 2012. — Vol. 45, № 6. — P. 425–428.

147. Tourab, W. Measurement and modeling of personal exposure to the electric and magnetic fields in the vicinity of high voltage power lines / W. Tourab, A. Babouri // *Saf. Health Work*. — 2016. — Vol. 7, No. 2. — P. 102–110.

148. Trangmar, S.J. Dehydration affects cerebral blood flow but not its metabolic rate for oxygen during maximal exercise in trained humans / S.J. Trangmar, S.T. Chiesa, C.G. Stock [et al.] // *The Journal of Physiology*. — 2014. — Vol. 592. — P. 3143–3160.

149. Trangmar, S.J. New Insights Into the Impact of Dehydration on Blood Flow and Metabolism During Exercise / S. J. Trangmar, J. González-Alonso // *Exercise and Sport Sciences Reviews*. — 2017. — Vol. 45. — P. 146–153.

150. Tsuji, B. Characteristics of hyperthermia-induced hyperventilation in humans / B. Tsuji, K. Hayashi, N. Kondo [et al.] // *Temperature*. - 2016. - № 3. - P. 146–160.
151. Van Den Heuvel, R. Haemopoietic cell proliferation in murine bone marrow cells exposed to extreme low frequency (ELF) electromagnetic fields / R. Van Den Heuvel [et al.] // *Toxicology in Vitro*. — 2001. — Vol. 15. — P. 351–355.
152. Vatau, D. 220 kV and 400 kV power plant electromagnetic pollution analysis / D. Vatau, F.D. Surianu, S. Musuroi [et al.] // 2011 IEEE EUROCON - International Conference on Computer as a Tool. — Lisbon, 2011. — P. 1–4.
153. Visan, G. Electric and magnetic field distribution in substations belonging to transelectrica TSO / G. Visan, I.T. Pop, C. Munteanu // 2009 IEEE Bucharest PowerTech. — Bucharest, 2009. — P. 1–5.
154. Watson, P. Mild hypohydration increases the frequency of driver errors during a prolonged, monotonous driving task / P. Watson, A. Whale, S.A. Mears [et al.] // *Physiology & Behavior*. — 2015. — Vol. 147. — P. 313–318.
155. WHO Fact Sheet No. 322: Electromagnetic fields and public health. — World Health Organization, 2014–2023.
156. World Health Data Platform: Exposure limits for low-frequency fields. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.who.int/data/gho/data/themes/topics/indicator-groups/indicator-group-details/GHO/exposure-limits-for-low-frequency-fields> (Дата обращения 09.02.2026).
157. Xiang, J. Health impacts of workplace heat exposure: an epidemiological review / J. Xiang, P. Bi, D. Pisaniello [et al.] // *Industrial Health*, National Institute of Occupational Safety and Health. – 2014. – Vol.52. – N.2. – P.91–101.
158. Zecca, L. Biological Effects of Prolonged Exposure to ELF Electromagnetic Fields in Rats: III. 50 Hz Electromagnetic Fields / L. Zecca, C. Mantegazza, V. Margonato [et al.] // *Bioelectromagnetics*. — 1998. — Vol. 19. — P. 57–66.

159. Zhang, X.A. Dynamic gating of infrared radiation in a textile / X.A. Zhang, S. Yu, B. Xu [et al.] // *Science*. – 2019. – Vol.363. – N.6427. – P.619-623.
160. Zhang, Y. An Investigation Into the Effects of Long-Term 50-Hz Power-Frequency Electromagnetic Field Exposure on Hematogram, Blood Chemistry, Fibrosis, and Oxidant Stress Status in the Liver and the Kidney From Sprague–Dawley Rats / Y. Zhang, J. Wang, X. Liu [et al.] // *Bioelectromagnetics*. — 2020. — Vol. 41, № 7. — P. 511–525.
161. Zhang, Y. An Investigation Into the Effects of Long-Term 50-Hz Power-Frequency Electromagnetic Field Exposure on Hematogram, Blood Chemistry, Fibrosis, and Oxidant Stress Status in the Liver and the Kidney From Sprague-Dawley Rats / Y. Zhang [et al.] // *Bioelectromagnetics*. — 2020. — Vol. 41.
162. Zhang, Y. Examination of the Effect of a 50-Hz Electromagnetic Field at 500 μ T on Parameters Related With the Cardiovascular System in Rats / Y. Zhang, L. Li, X. Liu [et al.] // *Frontiers in Public Health*. — 2020. — Vol. 8. — Art. 87.

Приложение А

Нормативно-методические документы

Изменение № 1 ГОСТ 12.4.172-2019 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Средства индивидуальной защиты от электрических полей промышленной частоты. Комплекты индивидуальные экранирующие. Общие технические требования. Методы испытаний
Опубликовано: ИУС № 1, 2025
Применяется с 01.08.2025

Страница 1

ИЗМЕНЕНИЕ № 1

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"*

* Государство-разработчик Россия. Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 01.10.2024 № 1348-ст вводится в действие на территории РФ с 01.08.2025 (ИУС № 1, 2025). -
Примечание изготовителя базы данных.

МКС 13.340.10

Принято Межгосударственным советом по стандартизации, метрологии и сертификации (протокол от 30.09.2024 № 177-П)

Зарегистрировано Бюро по стандартам МГС № 17598

За принятие изменения проголосовали национальные органы по стандартизации следующих государств: AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, UZ [коды альфа-2 по МК (ИСО 3166) 004]

Дату введения в действие настоящего изменения устанавливают указанные национальные органы по стандартизации*

* Дата введения в действие на территории Российской Федерации - 2025-08-01.

ИЗМЕНЕНИЕ № 1**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"***

* Государство-разработчик Россия. Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 01.10.2024 № 1349-ст вводится в действие на территории РФ с 01.08.2025 (ИУС № 1, 2025). - Примечание изготовителя базы данных.

МКС 13.340.10

Принято Межгосударственным советом по стандартизации, метрологии и сертификации (протокол от 30.09.2024 № 177-П)

Зарегистрировано Бюро по стандартам МГС № 17600

За принятие изменения проголосовали национальные органы по стандартизации следующих государств: AM, AZ, BY, RU, TJ, UZ [коды альфа-2 по МК (ИСО 3166) 004]

(Поправка. ИУС № 3-2026).

Дату введения в действие настоящего изменения устанавливают указанные национальные органы по стандартизации*

* Дата введения в действие на территории Российской Федерации - 2025-08-01.