

Рубцова Н.Б.¹, Перов С.Ю.¹, Белая О.В.¹, Шпиньков В.И.²

Гигиеническая оценка электромагнитных полей, создаваемых перспективными образцами энергетических установок

¹ФГБНУ «Научно-исследовательский институт медицины труда имени академика Н.Ф. Измерова», 105275, Москва, Россия;²ФГБНУ Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН, 115191, Москва, Россия

Введение. Анализ обеспечения электромагнитной безопасности лиц, профессионально связанных с обслуживанием и эксплуатацией установок, включённых в Федеральный проект «Разработка технологий управляемого термоядерного синтеза (УТС) и инновационных плазменных технологий», потребовал проведения натурных измерений и гигиенической оценки уровней электромагнитных полей (ЭМП) на рабочих местах персонала, осуществляющего разработку, обслуживание и эксплуатацию этих установок.

Материалы и методы. Проведены измерения и предварительная гигиеническая оценка частотных и интенсивностно-временных параметров ЭМП на рабочих местах персонала токамаков МИФИСТ-0, Т-11М, ТУМАН-3М, ФТ-2, магнитной ловушки МК-200М.

Результаты. Исследования показали, что уровни импульсных магнитных полей (МП) достигают очень высоких значений (до 433 мТл) и, несмотря на отсутствие официально действующих нормативных величин импульсных МП, согласно стандартным механизмам действия магнитной составляющей, могут являться фактором риска для здоровья человека. Зарегистрированные уровни ЭМП радиочастотного диапазона, имеющих кратковременный характер воздействия, способны оказывать на персонал неблагоприятное влияние, поскольку во всех точках возможного нахождения работников они во много раз превышали максимальный ПДУ (до 170 раз). Выявленные пики в амплитудно-частотных характеристиках электрической и магнитной составляющих ЭМП в диапазоне частот от 1 Гц до 1 кГц (несмотря на отсутствие гигиенических нормативов в этом диапазоне частот) также могут являться фактором риска для здоровья человека.

Ограничения исследования определяются отсутствием объективных данных по частотным и интенсивностно-временным параметрам ЭМП, генерируемых новыми образцами УТС.

Заключение. Пробные исследования по оценке уровней ЭМП, генерируемых на рабочих местах обследованных УТС, показали, что уровни импульсных МП, ЭМП радиочастотного диапазона, обеих составляющих ЭМП в диапазоне частот от 1 Гц до 1 кГц достигают высоких значений и, несмотря на отсутствие официально действующих нормативов, согласно стандартным механизмам действия фактора, могут являться фактором риска для здоровья человека.

Ключевые слова: электромагнитное поле; объекты новой ядерной техники; производственное воздействие; гигиеническая оценка и контроль

Соблюдение этических стандартов. Исследование не требует представления заключения комитета по биомедицинской этике или иных документов.

Для цитирования: Рубцова Н.Б., Перов С.Ю., Белая О.В., Шпиньков В.И. Гигиеническая оценка электромагнитных полей, создаваемых перспективными образцами энергетических установок. *Гигиена и санитария*. 2022; 101(10): 1190–1194. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2022-101-10-1190-1194> <https://elibrary.ru/klioll>

Для корреспонденции: Рубцова Нина Борисовна, доктор биол. наук, профессор, гл. науч. сотр. лаб. электромагнитных полей ФГБНУ «Научно-исследовательский институт медицины труда им. акад. Н.Ф. Измерова», 105275, Москва. E-mail: rubtsovanb@yandex.ru

Участие авторов: Рубцова Н.Б. — концепция и дизайн исследования, сбор материала, написание текста; Перов С.Ю. — дизайн исследования, сбор материала и обработка данных; Белая О.В. — дизайн исследования, сбор материала и обработка данных; Шпиньков В.И. — концепция исследования, редактирование. Все соавторы — утверждение окончательного варианта статьи, ответственность за целостность всех частей статьи.

Конфликт интересов. Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов в связи с публикацией данной статьи.

Финансирование. Исследование не имело финансовой поддержки.

Поступила: 26.08.2022 / Принята к печати: 3.10.2022 / Опубликовано: 23.10.2022

Nina B. Rubtsova¹, Sergey Yu. Perov¹, Olga V. Belaya¹, Vyacheslav I. Shpin'kov²

Hygienic assessment of electromagnetic fields generated by promising models of power plants

¹Izmerov Research Institute of Occupational Health, Moscow, 105275, Russian Federation;²Nuclear Safety Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, 115191, Russian Federation

Introduction. The analyses of staff occupationally connected with maintenance and operation of plants included in the Federal Project “Development of technologies for Controlled Thermonuclear Fusion (CTF) and innovative plasma technologies” electromagnetic safety problems required full-scale measurements of the electromagnetic fields (EMF) and hygienic assessment in personnel workplaces.

Materials and methods. Measurements of EMF frequency and intensity-time parameters and preliminary hygienic assessment in workplaces of Tokamaks MEFIST-0, T-11M, TUMAN-3M, FT-2, magnetic trap MK-200M were carried out.

Results. The studies showed very high levels of pulsed magnetic fields (MF) (up to 433 mT), despite of official regulatory values absence, according to magnetic component effects mechanisms can be assessed as human health risk factor. Radio frequency EMF levels, despite the short-term exposure, can have the adverse effect on human health, because in all points of possible employees' location there were exceeding the maximum permissible values (up to 170 fold). 1 Hz–1 kHz frequency range EMF electric and magnetic components amplitude-frequency characteristics peaks may be risk factor for human health too (despite the lack of this frequency range hygienic standards in Russia).

Limitations. The limitations of the study are determined by the lack of generated by new CTF samples EMF frequency and intensity-time parameters objective data.

Conclusion. *EMF assessment in examined CTF staff work places pilot study showed that pulsed MF, radio frequency EMF, 1 Hz–1 kHz frequency range EMF both components levels reach very high values and, despite the absence of officially valid regulatory values, according to factor action mechanisms, can be risk factor for personnel health.*

Keywords: *electromagnetic field; new nuclear technology objects; occupational exposure; hygienic assessment and control*

Compliance with ethical standards. *The study does not require the submission of the opinion of the biomedical ethics committee or other documents.*

For citation: Rubtsova N.B., Perov S.Yu., Belaya O.V., Shpin'kov V.I. Hygienic assessment of electromagnetic fields generated by promising models of power plants. *Gigiena i Sanitariya (Hygiene and Sanitation, Russian journal)*. 2022; 101(10): 1190–1194. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2022-101-10-1190-1194> <https://elibrary.ru/klioll> (In Russian)

For correspondence: *Nina B. Rubtsova*, MD, PhD, DSci., Professor, Chief Scientist, Electromagnetic field laboratory, Izmerov Research Institute of Occupational Health, Moscow, 105275, Russian Federation. E-mail: rubtsovanb@yandex.ru

Information about the authors:

Rubtsova N.B., <https://orcid.org/0000-0001-6306-777X>
Belaya O.V., <https://orcid.org/0000-0003-3937-4950>

Perov S.Yu., <https://orcid.org/0000-0002-6903-4327>
Shpin'kov V.I., <https://orcid.org/0000-0002-4715-8847>

Contribution: *Rubtsova N.B.* — the concept and design of study, collection material, writing a text; *Perov S.Yu.* — design of the study, collection and processing of material; *Belaya O.V.* — design of the study, collection and processing of material; *Shpin'kov V.I.* — the concept of the study, editing. *All authors* are responsible for the integrity of all parts of the manuscript and approval of the manuscript final version.

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.

Acknowledgement. The study had no sponsorship.

Received: August 26, 2022 / Accepted: October 3, 2022 / Published: October 23, 2022

Введение

Обеспечение безопасности работающих и населения при воздействии неионизирующих электромагнитных полей и излучений при сочетанном и комбинированном воздействии с другими факторами производственной и окружающей среды обуславливает необходимость их адекватной гигиенической оценки, что зачастую требует разработки и совершенствования методов контроля, принципов и средств защиты человека. Объекты экспериментально-стендовой и опытно-демонстрационной базы для проведения исследований и разработок в области управляемого термоядерного синтеза (УТС) и плазменных технологий, создание и реконструирование которых планируется в рамках Федерального проекта «Разработка технологий управляемого термоядерного синтеза и инновационных плазменных технологий» (далее — Федеральный проект), представляют собой источники комплекса физических факторов, в первую очередь ионизирующего излучения, но также и электромагнитных полей (ЭМП) различных частотных диапазонов и режимов генерации, воздействие которых на персонал до настоящего времени остаётся практически неисследованным, а их возможное влияние (особенно при сочетании с ионизирующим излучением) может служить фактором риска для здоровья персонала при обслуживании и эксплуатации объектов новой ядерной техники (ОНЯТ). В Российской Федерации и за рубежом в открытой печати имеется крайне мало сведений о возможном неблагоприятном влиянии на здоровье работающих сочетанного действия ионизирующего и неионизирующего излучений и обеспечения защиты.

Общие данные, характеризующие основные параметры установок УТС, свидетельствуют о том, что при создании, обслуживании и эксплуатации ОНЯТ будут задействованы мощные источники ЭМП различных спектральных диапазонов и назначений, в том числе планируется: создание мощных источников электромагнитного излучения различного спектрального диапазона, включая широкополосные различных назначений, с параметрами, превосходящими существующие аналоги (повышение мощности, эффективности, стабильности); разработка комплекса стендов для испытаний единичных сверхпроводников, сверхпроводниковых сильноточных токонесущих элементов, кабелей, модельных обмоток, в том числе разработка уникальной сверхпроводниковой магнитной системы до 25 Тл. В рамках этих направлений новые разработки будут включать в себя также источники высокоинтенсивных магнитных полей, электромагнитных полей диапазонов от 7–15 МГц до 40 ГГц и, в некоторых случаях, до 168 ГГц. Воздействие постоянных и

переменных магнитных полей, а также магнитных полей радиочастотного диапазона рассматривается как один из ключевых вопросов обеспечения защиты персонала установок управляемого термоядерного синтеза (УТС) с магнитным удержанием плазмы [1, 2].

Учёные, занимающиеся диагностикой плазмы, проводили отдельные исследования по оценке электромагнитной среды, создаваемой плазмой, и определению мер защиты оборудования. В США действует стандарт DOE-STD-6003-96 [3], который содержит руководство по обеспечению безопасности магнитных термоядерных установок для работающих и населения путём соблюдения требований стандарта DOE-STD-6002-96 [4]. Он предназначен для использования менеджерами, проектировщиками, операторами и другим персоналом, отвечающим за безопасность на таких объектах. Настоящий стандарт касается в основном крупных термоядерных установок, таких как Международный термоядерный экспериментальный реактор. Использование приоритизации рисков на основе концепции, представленной в стандарте, может быть также применено к другим объектам магнитного термоядерного синтеза. В стандарте DOE-STD-6003-96 [3] практически впервые перечислены наряду с ионизирующим излучением и имеющиеся электромагнитные факторы риска для здоровья персонала при эксплуатации крупных УТС, при этом данные об уровнях и гигиенической оценке в доступной литературе отсутствуют.

В других зарубежных руководствах по обеспечению электромагнитной безопасности такого рода систем также не удаётся найти адекватной системы регулирования безопасности персонала. Например, в предварительном отчёте о комплексной безопасности, представленном агентством по ядерной безопасности Франции [5], абсолютно некорректно дана ссылка на нормативный документ по обеспечению безопасности населения [6], а вопросы профессиональной безопасности вообще не затронуты.

В России основным нормативным документом, регламентирующим производственные и внепроизводственные воздействия ЭМП различных частотных диапазонов, являются СанПиН 1.2.3685–21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания»¹, устанавливающие ПДУ производственных и внепроизводственных воздействий электростатического поля (ЭСП); постоянного

¹ СанПиН 1.2.3685–21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания». Утв. постановлением № 2 Главного государственного санитарного врача Российской Федерации от 29.01.2021 г.

магнитного поля (ПМП); синусоидального электрического и магнитного поля частотой 50 Гц; импульсного магнитного поля частотой 50 Гц; ЭП и МП диапазона частот 10–30 кГц; электрического поля в диапазоне частот от ≥ 30 кГц до 300 МГц, магнитного поля в диапазонах частот $\geq 0,03$ –3 и ≥ 30 –50 МГц и ЭМП в диапазоне частот от ≥ 300 МГц до 300 ГГц; гигиеномагнитного поля. При этом в отечественных нормативах производственных воздействий отсутствует нормирование и контроль импульсов ПМП, ЭП и МП в диапазоне частот от > 0 до < 50 Гц и от > 50 Гц до < 10 кГц, а также МП в диапазонах частот ≥ 3 –30 МГц и ≥ 50 –300 МГц.

В соответствии с этим высокую актуальность представляет анализ обеспечения электромагнитной безопасности лиц, профессионально связанных с обслуживанием и эксплуатацией установок, включённых в Федеральный проект, для определения направлений развития нормативно-правовой базы регулирования безопасности ОНЯТ. Одной из основных задач, требующих решения, является проведение натурных измерений и гигиенической оценки уровней электромагнитных воздействий на рабочих местах персонала, осуществляющего разработку, обслуживание и эксплуатацию экспериментальных установок, включённых в Федеральный проект.

Материалы и методы

В рамках натурных исследований и предварительной гигиенической оценки частотных и интенсивностно-временных параметров электромагнитных воздействий, возникающих на рабочих местах персонала, осуществляющего разработку, обслуживание и эксплуатацию ОНЯТ, проводились обследования нескольких экспериментальных установок, включённых в Федеральный проект, — токамаков МИФИСТ-0, Т-11М, ТУМАН-3М, ФТ-2, магнитной ловушки МК-200М и др. Для проведения исследований были выбраны действующие на момент проведения измерений типовые режимы работы установок с параметрами, рекомендованными ответственным персоналом. Для гигиенической оценки определяли характеристики режимов и условий труда персонала (профмаршрут).

Инструментальный контроль уровней ЭМП проводили по результатам оценки:

- импульсного магнитного поля;
- квазипостоянного (переменного) магнитного поля;
- квазипостоянного (переменного) электрического поля;
- магнитного поля промышленной частоты (50 Гц);
- электрического поля промышленной частоты (50 Гц);
- электромагнитного поля сверхвысокочастотного диапазона.

При измерениях были использованы измеритель параметров электромагнитного поля селективный Narda SRM-3006, измеритель параметров электромагнитного поля Narda NBM-550, измеритель электрического и магнитного поля Narda EFA-300, миллитесламетр портативный универсальный ТП2-2У, измеритель электрического и магнитного поля Narda ENP-50F, магнитометр Narda HP-01.

Результаты

В исследованиях по оценке уровней импульсных магнитных полей, спектральных составляющих низкочастотных электрических и магнитных полей, радиочастотных ЭМП, которые характеризуют возникающие и возможные условия экспозиции персонала для типовых режимов эксплуатации каждой установки, были получены следующие данные.

Зарегистрированные уровни импульсных магнитных полей на рабочих местах персонала, осуществляющего обслуживание и эксплуатацию ОНЯТ, для разных установок составляли от 2,24 до 433 мТл. При этом максимальные уровни были зарегистрированы во время разряда плазмы: на токамаке ФТ-2 и установке МК-200М они составили 148,8 и 433 мТл соответственно.

Спектральный анализ уровней напряжённости электрического поля E (В/м) и магнитной индукции B (мкТл) в диапазоне частот от 1 Гц до 1 кГц показал нестандартное распределение амплитудных значений напряжённости ЭП и магнитной индукции по частотным характеристикам. И если для установок Туман-3М, ФТ-2 и МК-200М наиболее значимые уровни напряжённости ЭП и магнитной индукции отмечали на частотах 2,4; 4,9; 9,8 и отчасти 7,3 Гц, то для установки МИФИСТ-0 были выявлены пики амплитудных значений напряжённости электрического поля и магнитной индукции на частотах 1 и 2,4 Гц. Кроме того, вблизи токамака МИФИСТ-0 в режиме включения только системы индуктора в спектре ЭП наблюдались максимумы на частоте 50 Гц и её гармониках, а также в квазистатической области на частоте 1 Гц. Наибольшее значение напряжённости ЭП на частоте 50 Гц составило 98,6 В/м, а на частоте 1 Гц — 57,6 В/м. Вблизи токамака МИФИСТ-0 в режиме совместной работы систем тороидального магнитного поля и индуктора в спектре ЭП также наблюдались максимумы на частотах 50 Гц (60,7 В/м) и 1 Гц (57,7 В/м). При дополнительном включении системы СВЧ-нагрева амплитуда спектральных компонент на частотах 50 и 1 Гц практически не изменилась при небольшом увеличении амплитуд остальных низкочастотных компонент спектра.

Вблизи токамака Т-11М в различных режимах эксплуатации наблюдались максимумы на частотах 5 и 10 Гц как в спектрах ЭП, так и в спектрах МП. Наибольшие значения напряжённости ЭП на частотах 5 и 10 Гц зафиксированы для режима включения ТМП (2,5 кВ) и составили 4,4 и 3,6 В/м. Наибольший уровень ЭП на частоте 50 Гц наблюдался в режиме плазмы и достигал 0,85 В/м. В спектре МП вблизи токамака Т-11М (точка № 4) наблюдалось большее количество гармоник частоты 50 Гц по сравнению со спектром ЭП, однако максимальные значения 2 и 1,2 мкТл (режимы плазмы) также соответствовали частотам 5 и 10 Гц.

Для спектра ЭП, возникающего на рабочем месте в пультной токамака ТУМАН-3М, было характерно наличие максимумов на частотах 2,4 и 4,9 Гц с уровнями 18,2 и 8,4 В/м соответственно. Также наблюдались максимумы на частоте 50 Гц (4,9 В/м) и её гармониках. В режиме включения дополнительных систем полоидального магнитного поля максимальный уровень напряжённости ЭП достигал 23,2 В/м.

Изучение спектров низкочастотных МП, возникающих вблизи токамака ФТ-2 во время типовых режимов его эксплуатации, показало максимальные уровни индукции МП на частотах 2,4; 4,9; 7,3 и 9,8 Гц, а также на частоте 50 Гц и её гармониках. Наибольшие амплитуды спектральных компонент МП были зафиксированы для режима плазмы и достигали 110,4 мкТл на частоте 9,8 Гц, 98,8 мкТл на частоте 4,9 Гц, 89,7 мкТл на частоте 7,3 Гц и 76,8 мкТл на частоте 2,4 Гц. Максимальный уровень индукции МП на частоте 50 Гц составил 30,5 мкТл.

При дополнительном нагреве плазмы с помощью электромагнитной энергии радиочастотного диапазона измерения уровней ЭМП в диапазонах частот 900 МГц и 2,45 ГГц показали, что вблизи токамака МИФИСТ-0 на расстоянии 1 м от волновода наибольший уровень ППЭ составлял 169,6 мВт/см² в режиме включения всех систем установки (что в 169 раз превышает максимальный ПДУ кратковременных производственных воздействий), и даже на рабочем месте в пультной отмечено превышение максимально допустимого ПДУ кратковременных воздействий. Вблизи токамака ТУМАН-3М уровни ЭМП в диапазоне частот 835–925 МГц составили 1,178–1,734 мВт/см² и также превышали значение максимального ПДУ кратковременных производственных воздействий (1 мВт/см²).

Обсуждение

Полученные в настоящем исследовании результаты показали, что преимущественный вклад в электромагнитную обстановку на рабочих местах при эксплуатации

экспериментальных установок термоядерного синтеза с магнитным удержанием плазмы вносит импульсное магнитное поле высокой интенсивности, наибольшие уровни которого регистрировались во время разряда плазмы до 148,8 и 433 мТл. Гигиеническая оценка уровней импульсных МП таких параметров крайне затруднительна, поскольку в Российской Федерации отсутствуют гигиенические регламенты импульсных МП (за исключением импульсных МП с несущей частотой 50 Гц). Простое сопоставление зарегистрированных величин импульсного МП показывает, что они в некоторых случаях на порядок превышают ПДУ постоянного МП (согласно гигиеническим нормативам) даже для условий локального воздействия на конечности до 10 мин за рабочую смену, а при сопоставлении с нормативными значениями импульсных МП (с несущей 50 Гц) превышение составляет два порядка величин. Следовательно, зарегистрированные в исследованиях уровни импульсных МП, несмотря на недостаточную изученность вопроса, не могут рассматриваться как безопасные для здоровья персонала и способны стать фактором риска для здоровья работников. На рабочих местах сотрудников рядом с другими установками импульсные МП были несколько ниже, однако они всё равно должны рассматриваться как гигиенически значимые. При этом следует отметить, что в исследованиях проведена гигиеническая оценка не самых мощных из имеющихся в нашей стране источников МП в новых образцах экспериментальных УТС.

Спектральный анализ уровней напряжённости электрического поля E (В/м) и магнитной индукции B (мкТл) в диапазоне частот от 1 Гц до 1 кГц показал нестандартное распределение амплитудных значений напряжённости ЭП и магнитной индукции по частотным характеристикам, различающееся для различных установок. Эти данные имеют высокую значимость, поскольку зарегистрированные максимальные уровни напряжённости ЭП хоть и не достигают нормативных для диапазона 50 Гц значений, но в силу вероятности неблагоприятного влияния частот, отличных от промышленной частоты (по данным W.R. Adey и его последователей, за счёт наличия амплитудных и частотных окон в биологической эффективности ЭМП СНЧ-диапазона) [7], могут быть более биологически эффективными в части воздействия ЭП на частотах, отличных от 50 Гц. При этом наибольшую значимость представляют эффекты именно магнитной составляющей сверхнизкочастотного диапазона, которая, согласно оценке Международного агентства по исследованиям рака (МАИР) [9], была отнесена к факторам риска развития лейкозов по категории «2b». Таким образом, зарегистрированные на этих частотах уровни МП достигали значений до 98,8 мкТл, что практически равно нормативному значению МП ПЧ для условий производственных воздействий. Следует ещё раз отметить, что в Российской Федерации отсутствуют гигиенические нормативы и электрической, и магнитной составляющих как производственных, так и внепроизводственных воздействий в диапазоне частот от > 0 до > 50 Гц и от > 50 Гц до < 10 кГц. Тем не менее и международный опыт исследований, и основанная на нём концепция МАИР обосновывают необходимость оценки такого рода воздействий как фактора риска для здоровья человека [8].

В рамках решения задач по гигиенической оценке возможных уровней воздействия ЭМП на персонал ОНЯТ типа УТС представляют интерес результаты подобных исследований, выполненных на установке LHD в Японии [9–11]. Так, авторами отмечено, что отличительной особенностью установок термоядерного синтеза с магнитным удержанием плазмы является наличие электромагнитных импульсов и переменных ЭМП, в том числе от сверхнизких частот от 60 Гц до 168 ГГц [11]. К основным электрическим устройствам и системам относили сверхпроводящую электромагнитную систему, источник пи-

тания катушки и двигатель-генератор, который включал источник питания для системы инъекции нейтрального луча, микроволновый генератор 2,45 ГГц для разрядной очистки первой стенки, устройства для нагрева плазмы – систему электронно-циклотронного резонансного нагрева (5,4 МВт/84–168 ГГц) и ионно-циклотронного резонансного нагрева (3 МВт/25–100 МГц) [11]. По результатам исследований [9], уровень постоянного магнитного поля за пределами области, используемой в качестве радиационной защиты, в случае плазменного режима 1,5 Тл составлял 0,05 мТл за пределами зоны радиационной защиты (двухметровой бетонной стены) и 70 мТл вблизи криостата. Полученные нами результаты пробных исследований в некоторой степени согласуются с имеющимися в доступной литературе зарубежными данными, несмотря на значительные расхождения в действующих у нас в стране и за рубежом гигиенических регламентов ЭМП различных частотных диапазонов, так как в указанных документах наибольшее внимание уделяется магнитной составляющей как самому значимому фактору риска для здоровья.

Отсутствие в наших исследованиях данных о превышении ПДУ производственных воздействий ЭП и МП частотой 50 Гц на рабочих местах персонала установок УТС обусловлено конструктивными особенностями обследованных установок. В то же время при использовании в качестве источника питания более мощных силовых установок (например, в токамаке Глобус-М2) нельзя исключить наличие неблагоприятного влияния и ЭП и МП частотой 50 Гц. Обеспечение сохранения здоровья персонала обуславливает необходимость жёсткого контроля уровней электрических и магнитных полей промышленной частоты на электросетевых объектах, входящих в комплексы ОНЯТ и обеспечивающих всю систему их питания (открытые распределительные устройства напряжением 110 кВ (возможно, и 220), закрытые распределительные устройства, воздушные и кабельные линии электропередачи).

Особо следует отметить, что в отечественной практике до настоящего времени не рассматривались специально вопросы возможного неблагоприятного влияния на работающих ЭМП различных частотных диапазонов и режимов генерации, которые создаются на рабочих местах персонала при генерации ионизирующего излучения. Единственным относительным исключением можно считать гигиенические нормативы импульсных электромагнитных полей (ИЭМП), создаваемых при работе установок и технических средств специального назначения, для персонала РТО ИЭМП в зависимости от временных параметров электромагнитных импульсов. Частично можно учитывать нормативные значения импульсных МП с несущей частотой 50 Гц, которые в своё время были разработаны для регламентации импульсных МП, создающихся на рабочих местах при проведении контактной сварки. Однако эти регламенты не могут быть распространены на обеспечение электромагнитной безопасности персонала перспективных термоядерных и гибридных систем в силу большого числа особенностей генерации и недостаточной изученности вопроса.

Заключение

Проведённые пробные исследования по измерениям и гигиенической оценке уровней ЭМП, генерируемых на рабочих местах обследованных типов ОНЯТ, показали, что уровни импульсных МП на рабочих местах достигают очень высоких значений и могут являться фактором риска для здоровья человека (согласно стандартным механизмам действия магнитной составляющей) даже при отсутствии официально действующих нормативных величин. Зарегистрированные уровни ЭМП радиочастотного диапазона, несмотря на кратковременный характер их воздействия, однозначно могут оказывать неблагоприятное влияние на здоровье работающих, поскольку во всех точках возможного нахождения

персонала они превышали максимальный ПДУ для условий кратковременного воздействия за рабочую смену. При этом выявленные пики в амплитудно-частотных характеристиках электрической и магнитной составляющих ЭМП в диапазоне частот от 1 Гц до 1 кГц (в отсутствие гигиенических нормативов в этом диапазоне частот) также могут являться фактором риска для здоровья человека.

Предварительные результаты свидетельствуют о необходимости гигиенической оценки ЭМП во всех диапазонах частот и режимах генерации, которые применяются в ОНЯТ, и подтверждают необходимость совершенствования отечественных гигиенических нормативов, особенно в части регламентации магнитной составляющей в ранее не нормированных диапазонах частот и режимах генерации.

Литература

(п.п. 1–9, 11 см. References)

10. 宇田 達彦, 棚橋 秀伍, 大林 治夫, 中司 等, 伊藤 麻理子. 大型プラズマ実験施設における静磁場および極低周波磁場環境の測定. 保健物理 2000; 35 (1): 53–63. <https://doi.org/10.5453/jhps.35.53>

References

1. Cadwallader L.C. Personnel safety at magnetic fusion experiments. *IEEE Transactions on Plasma Science*. 2019; 47(1): 869–73. <https://doi.org/10.1109/TPS.2018.2877357>
2. WHO. Compendium of WHO and other UN guidance on health and environment. Geneva; 2021. Available at: <https://www.who.int/publications/i/item/WHO-HEP-ECH-EHD-21.02>
3. DOE-STD-6003-96. Safety of magnetic fusion facilities: Guidance. Washington: United States Department of Energy; 1996. Available at: <https://www.standards.doe.gov/standards-documents/6000/6003-astd-1996/@images/file>
4. DOE-STD-6002-96. Safety of magnetic fusion facilities: Requirements. Washington: United States Department of Energy; 1996. Available at: <https://www.standards.doe.gov/standards-documents/6000/6002-astd-1996/@images/file>
5. ITER. Preliminary Safety Report. ITER_D_3ZR2NC – Version 1.0: Volumes I and II; 132–4.
6. Official Journal of the European Union. COUNCIL RECOMMENDATION 1999/519/ EC on the limitation of exposure of the general public to electromagnetic fields (0 Hz to 300 GHz). (1999/519/EC). Available at: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:31999H0519&from=EN>
7. Adey W.R. Frequency and power windowing in tissue interactions with weak electromagnetic fields. *Proceedings of the IEEE*. 1980; 68(1): 119–25. <https://doi.org/10.1109/PROC.1980.11591>
8. IARC Monograph. Volume 80. Non-ionizing Radiation, Part 1: Static and Extremely Low-frequency (ELF) Electric and Magnetic Fields; 2002. Available at: <https://publications.iarc.fr/Book-And-Report-Series/Iarc-Monographs-On-The-Identification-Of-Carcinogenic-Hazards-To-Humans/Non-ionizing-Radiation-Part-1-Static-And-Extremely-Low-frequency-ELF-Electric-And-Magnetic-Fields-2002>
9. Tanaka M., Seki T., Wang J., Kamimura Y., Uda T., Fujiwara O. A new wide-Area monitoring system of electromagnetic fields around megawatt-class amplifiers for ion cyclotron range of frequency heating at a fusion test facility. *IEEE Transactions on Plasma Science*. 2021; 49(4): 1475–83. <https://doi.org/10.1109/TPS.2021.3066434>
10. Uda T., Tanahashi S., Obayashi H., Nakatsuka H., Ito M. Measurement of static and extremely low frequency magnetic fields around a large plasma experimental facility. *Jpn J. Health Phys*. 2000; 35(1): 53–63. <https://doi.org/10.5453/jhps.35.53> (in Japanese)
11. Tanaka M., Takami S., Uda T., Wang J. A remote monitoring system of high frequency electromagnetic field in a magnetic confinement fusion test facility. *IEICE Proceedings Series*. 2009; 14(23S2–5): 629–32. <https://doi.org/10.34385/proc.14.23S2-5>