

максимальное время, по истечении которого площадь зоны загрязнения уменьшается в 2 раза, не превышает 23 лет.

Расчетные исследования характеристик зон загрязнения были проведены в предположении, что постоянная выхода радионуклидов из твэлов равна 10^{-2} 1/год, однако результаты многолетних наблюдений за состоянием затопленной подводной лодки «Комсомолец» и радиационной обстановкой вблизи нее [6] показывают, что эта величина, возможно, завышена. Оценка параметров зон загрязнения для постоянной выхода радионуклидов из твэлов 10^{-3} 1/год при принятых исходных данных показала уменьшение максимальной площади загрязнения в 10—25 раз.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аншолонов Е.М., Нестеров А.Б. Прогнозирование объемов повреждений корпусов подводных кораблей с атомными энергетическими установками и вспомогательных судов, перевозящих радиоактивные вещества, при типовых навигационных авариях. — Труды Межд. конф. «Военно-морской флот и судостроение в современных условиях», Санкт-Петербург, 26—29 февраля 1996 г. Секция А, т. 3.
2. Морская коррозия. Справочник. Под ред. М. Шумахера. Пер. с англ. М.: Металлургия, 1983.
3. Дожников С.И., Журавков А.М., Золотков А.А. Коррозионная стойкость отработавшего ядерного топлива в морской воде. — В кн.: Сборник докл. Межд. научного семинара ЯО СССР 24—28 сентября 1990 г. в Мурманске. М., 1991.
4. Монин А.С., Яглом А.М. Статистическая гидромеханика, ч. 1. М.: Наука, 1965.
5. Озмидов Р.В. Диффузия примесей в океане. Л.: Гидрометеоиздат, 1986.
6. Rubanov S.M., Kuznetsov Yu.V., Nosov N.A. Monitoring of Radioecological Situation in the Regions of Lost of Nuclear Submarine «Komsomolets». *Umweltradioaktivität. Radiökologie. Strahlenwirkungen.* Bd 1.25. Jahrestagung. Binz auf Rügen, 28—30 September, 1993.
7. Океанология. Химия океана, т. 1. Химия вод океана. М.: Наука, 1979.
8. Булатов Р.П., Баран С.М., Иваненков В.Н., Марти Ю.Ю. Атлантический океан. М.: Мысль, 1972.
9. Набатов В.Н., Озмидов Р.В. Исследование турбулентности придонного слоя в океане — Океанология, 1987, т. XXVIII, вып. 1, с. 5.
10. Арсеньев С.А., Доброклонский С.В., Мамедов Р.М., Шелковников Н.К. Прямые измерения характеристик мелкомасштабной морской турбулентности с неподвижной платформы в открытом море. — Известия АН СССР, Физика атмосферы и океана, 1975, т. 11, №8, с. 845.
11. Kundu P.K. *Bottom Turbulence.* Amsterdam, Elsevier Sci. Publ. Corp, 1977. 204 p.
12. Монин А.С., Озмидов Р.В. Океаническая турбулентность. Л.: Гидрометеоиздат, 1981.
13. Гусев Д.И. Гигиенические критерии к оценке загрязнения радионуклидами прибрежных морских вод. — In: Proc. Symp. IAEA Impacts of Radionuclide Releases Into Aquatic Environment, Olaniem, 1975. Vienna, 1975, p. 363.
14. Нормы радиационной безопасности НРБ-76/87 и Основные санитарные правила работы с радиоактивными веществами и другими источниками ионизирующих излучений ОСН-72/87. М.: Энергоатомиздат, 1988.

Поступила в Редакцию 21.05.96

УДК 621.039.6.538.3

БЕЗОПАСНОСТЬ ПЕРСОНАЛА В УСЛОВИЯХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ ТЕРМОЯДЕРНОГО РЕАКТОРА ИТЭР

Фомин Г.В. (ГНЦ РФ — Институт биофизики)

Персонал ИТЭРа может подвергаться воздействию различных видов неионизирующего излучения:

магнитного поля постоянного и квазипостоянного, обусловленного токами плазмы и магнитных катушек, и импульсного, связанного с колебаниями плазмы;

ВЧ- и СВЧ-излучения оборудования для нагрева плазмы;

лазерного излучения оборудования для диагностики плазмы;

электрического и магнитного поля промышленной частоты высоковольтного оборудования;

циклотронного излучения (СВЧ-излучения выше 100 ГГц), возникающего в результате магнитотормозного излучения отдельных электронов.

Цель настоящей работы — разработка рекомендаций и требований по защите персонала при проектировании ИТЭРа. В силу его международного характера необходимо объединить все национальные критерии электромагнитной безопасности.

Критерии электромагнитной безопасности. Различают три уровня воздействия электромагнитных полей на биосистемы: первичные физико-химические, кибернетические и общие механизмы биологического действия [1]. В основе первичных механизмов лежат физико-химические законы их взаимодействия с веществом: изменение траектории движущихся в магнитных полях заряженных частиц, например, эритроцитов, смещение или вращение анизотропных частиц, имеющих различную магнитную восприимчивость, изменения биогенного магнетита в клетках магниторецепторов [2], химическая поляризация электронов и ядер, приводящих к изменению кинетики радикальных химических реакций, расщепление квантовых уровней (эффект Зеемана) и т.д. Первичные физико-химические механизмы не могут ни предсказать, ни объяснить биологические эффекты, так как между первичным взаимодействием электромагнитного поля с элементами организма и биологическим эффектом имеется множество переходных звеньев, большинство которых неизвестны. Многие промежуточные звенья охвачены взаимопереплетающимися обратными связями. Поэтому для биологии и медицины более существенным является выяснение кибернетических механизмов действия электромагнитных полей, которые сформулированы в виде эмпирических обобщений. Общие механизмы действия электромагнитного поля, как и любые патофизиологические процессы, являются общими для всех направлений медицины и не имеют «электромагнитной» специфики.

В настоящее время большинство опубликованных работ касается энергетической концепции воздействия электромагнитных полей, в которой биологические эффекты пропорциональны поглощенной энергии излучения, т.е. поглощенной дозе [3—7].

Информационное воздействие характеризуется тем, что его эффекты определяются модуляцией влияющего фактора и состоянием систем организма [8—14]. Малочисленность научных работ об информационном воздействии подчеркивает их научную новизну, однако теоретически возможно, что энергетическое воздействие будет частным случаем информационного, так как есть не только частотная, но и амплитудная модуляция [9]. Термин «модуляция» специалисты понимают по-разному: модуляция колебаний — это медленное по сравнению с периодом колебаний изменение амплитуды, частоты или фазы колебаний по определенному закону (БСЭ, 1974), отображение пространства сигнала в пространство сообщения [15], изменяющийся по определенному закону радиотный спектр, т.е. ритм сигнала. Для нашего случая полезно последнее понимание радиоинженеров, так как амплитудная, кодово-импульсная и фазовая модуляция по преобразованию Фурье непосредственно связаны с частотной модуляцией. По существу процесс измерения (детектирования), в том числе и в дозиметрии, тоже основан на модуляции или демодуляции.

Уже с тех пор, как СВЧ-техника получила широкое распространение, стало известно, что СВЧ-волны большой мощности могут вызвать у человека развитие ожога или теплового удара. Позже были получены результаты исследований, доказывающие наличие неблагоприятных эффектов при действии электромагнитных полей более низкой частоты и интенсивности, в частности, таких эффектов, как изменение скорости химических реакций [16], нарушение иммунной системы, нарушения в составе белой крови [8, 17], повреждение хромосом, развитие раковых опухолей [3] и др. Действующее в настоящее время нормирование, как правило, ограничивает величины, пропорциональные энергии электромагнитного поля [6]. Только в редких случаях учитываются другие биотропные параметры: длительность воздействия, характер импульсов, градиент и направленность поля [1, 4, 18]. Интерес к информационным процессам для биологических систем можно объяснить тем, что основополагающие работы

К. Шеннона по теории информации и Н. Винера по кибернетике вышли только 40 лет назад. Тогда было установлено, что система передачи информации состоит из передатчика, канала передачи, подверженного шуму, и приемника. Основными параметрами для передачи информации через канал являются природа сигнала, затухание, шум, конфигурация приемника и передатчика, модуляция (ширина частотной полосы), скорость передачи информации в канале. Работы об информационном воздействии электромагнитного поля на организм следует разделить на три типа: передача информации от источника излучения к живой системе (перенос информации электромагнитным полем); передача информации в живой системе; изменение информации или энтропии системы при воздействии электромагнитного поля.

Впервые электромагнитный канал связи изучался с физической точки зрения в работах [19], где отмечалось, что теория информации должна рассматриваться как ветвь физики, а не как математическая дисциплина. Но лишь в классической работе Л. Бриллюэна [20] был сформулирован в общем виде неэнтропийный принцип информации и установлена глубокая связь между энтропией и информацией. С точки зрения этого принципа всякая информация представляется некоторым состоянием физической (биологической) системы и связана с ее отклонением от термодинамического равновесия или состояния с равными вероятностями [8]. В дальнейшем [20] были использованы квантово-механические представления для рассмотрения канала передачи информации, который образуется передатчиком, излучающим электромагнитный сигнал средней мощностью $P_{\text{ср}}$, и приемником, на который воздействует сигнал и аддитивный шум (тепловое излучение) мощностью $P_{\text{ш}}$. В результате для максимальной скорости передачи информации была физически обоснована известная формула

$$C = \Delta f \log_2(1 + P_{\text{ср}}/P_{\text{ш}}). \quad (1)$$

Здесь Δf — ширина частотной полосы, где сосредоточена мощность сигнала, т.е. промодулирован сигнал. По сути Δf и есть модуляция. Формула верна для электромагнитных полей частотой до 10^{10} Гц. Для рентгеновского и γ -излучения в работе [20] определены другие выражения.

Возможно, что первой работой по применению теории информации в биологических жидких системах была [21], затем последовала [22]. В них рассматриваются два основных вида канала передачи информации: нервная и гуморальная система, в частности, система крови. Хотя нейрон, как и любая клетка, жидкая система и в некоторых нейронах обнаружены магниторецепторы [2], нагляднее представления по гуморальному каналу, в котором соответствие между потоком вещества и передачей сигналов более тесное. Гуморальный канал может передавать сигнал химическим путем в виде гормонов, растворенных газов (CO_2 , O_2 , N_2), физическим путем (температура, давление) или посредством прямо передаваемых объектов (эритроциты, лейкоциты и др.) [22].

Модуляция имеет первостепенное значение для передачи информации. Именно она приводит сигнал в соотношение с характеристиками среды, иначе он не будет пригоден для передачи. Это выполняется за счет наложения сигнала на волну носителя. Так, широко известно, что рот двигается с низкой частотой (менее 10 Гц), а для передачи сигнала на большое расстояние по воздуху сигнал модулируется посредством голосовых связей, генерирующих высокую частоту. Точно также предкапиллярные сфинктеры могут рассматриваться как модуляторы потока эритроцитов и лейкоцитов. Сердце тоже модулирует сигналы, дыхание модулирует обонятельные сигналы, сигналы легочных газов и даже ритм сердечных сокращений. Для оценки максимальной скорости передачи информации в гуморальном канале [22] также используется формула (1), с помощью которой оценена скорость передачи информации в артериях, капиллярах, нервной системе. В среднем она составляет около 100 бит/с.

Концепция информационного воздействия электромагнитных полей была впервые выдвинута в работе [23] и формировалась в 60-х годах, когда некоторые эксперименты не могли объяснить с помощью концепции энергетического воздействия. В современном виде информационная концепция представляется следующим образом. Неспецифическое влияние электромагнитного поля на живой организм реализуется путем развития различных неспецифических реакций организма: стресса, тренировки, активации и соответствующих им состояний ареактивности [8, 12]. Анализ структуры процессов гомеостаза при стрессе показывает, что в живой системе возникают нескоординированные процессы, которые идут вразнобой и могут конкурировать. Уровень самоорганизации различных сервисных подсистем при этом резко падает и их состояние становится более неопределенным. Это сопровождается резким увеличением информационной энтропии как функции выравнивания вероятностей систем. Причем часто наблюдаются флуктуации энтропии, т.е. система, минувшая состояние нормы, впадает в состояние с минимальной энтропией, затем в максимальное и т.д., т.е. возникают колебания. Одновременно может уменьшиться объем информационного взаимодействия с окружающей средой, т.е. система на определенном этапе все больше приобретает свойство замкнутой. Это в свою очередь согласно второму закону термодинамики в отношении к биологическим системам [24] приводит к еще большему увеличению энтропии, а также резкому падению резистентности, что в конечном счете вызывает болезни (чаще всего сердечно-сосудистые) и даже полную деградацию системы, смерть [8]. В то же время состояния с высокой резистентностью — реакции тренировки и активации характеризуются более высокой упорядоченностью, причем вдали от положения равновесия. Условием снижения упорядоченности системы и возникновения стресса является информационная замкнутость процессов гомеостаза и флуктуации под действием электромагнитных полей. Вывод из стресса должен предусматривать обогащение информационного потока, иными словами, должно быть увеличено разнообразие типов воздействия и модуляций. В этом, вероятно, состоит лечебное действие электромагнитных полей. Однако при большой интенсивности информационного потока, т.е. при большой скорости передачи информации, возникают флуктуации, также приводящие к стрессу [8]. Изменение энтропии систем организма обычно составляет несколько бит [25]. Необходимо еще учесть количество информации, переносимой электромагнитным полем из организма человека, так как (организм) он обладает своими электрическими и магнитными полями, в настоящее время получившими диагностическое значение [1].

В чем преимущества концепции информационного воздействия? Только с помощью этой концепции можно объяснить экспериментальные факты [9, 10] зависимости биологических эффектов от изменения частоты электромагнитного поля, объяснить и спланировать дальнейшие эксперименты по вызову устойчивых стрессовых и патологических состояний животных со смертельным исходом. Концепция энергетического воздействия электромагнитных полей показала свою частичную несостоятельность, например, в том, что при кратковременном воздействии сверхсильных (около 1 Тл) магнитных полей изменение состояния организма незначительное [1]. В качестве примера полезно также рассмотреть воздействие электромагнитного поля миллиметрового диапазона длины волны из работы [9], где представлены зависимости эффекта его воздействия на кроветворную систему опытных животных (мышей и крыс). В этой работе можно проследить малую зависимость эффекта воздействия от мощности облучения волнами миллиметрового диапазона, показана острорезонансная зависимость биологического эффекта от отношения ширины частотной полосы воздействия к частоте $\Delta f/f$. В работе [10] показано, что для импульсного излучения биологический эффект пропорционален $\Delta f/T$, где T — период повторения импульсов (период модуляции).

Наличие двух концепций воздействия электромагнитных полей приводит к выводу о том, что на ИТЭРе необходимо контролировать частотные и энергетические пара-

метры воздействующего излучения, а также оценивать изменения состояния здоровья работающих на основе донозологической гигиенической диагностики [26]. Необходимо связать информационные параметры электромагнитного поля с изменением состояния здоровья. Методические рекомендации [12, 13] по оценке состояния организма на основе адаптационных реакций не учитывают того, что изменения показателей состояния здоровья работающих возникают при хроническом воздействии электромагнитного поля через 2—3 года [4]. Поэтому методика [13] была дополнена ретроспективной и прогностической оценкой на основе энтропийного метода [25], и изменение энтропии систем организма, в частности, системы белой крови связано с количеством информации, переносимой электромагнитным полем [20]. Такая модель обрабатывалась методически [27—29], и в ее основу положено измерение эффекта воздействия и самого воздействия в одних и тех же величинах, т.е. в битах.

Особенностью ИТЭРа является комбинированное воздействие ионизирующего и неионизирующего излучения на персонал и население [27]. Данные о комбинированном, в частности, синергитическом действии излучения не отвечают запросам практики. Результаты экспериментальных исследований часто не сравнимы и не равнозначны, поскольку не всегда соблюдается и учитывается порядок действия разных факторов, уровни воздействия велики и не соответствуют производственным и бытовым условиям, т.е. большинство экспериментальных исследований поставлены в плане концепции энергетического воздействия, а это значит, что для достижения эффекта, обычно связанного с развитием лучевой болезни, авторы стремятся использовать сверхсильную дозу и сверхсильное электромагнитное излучение, которое редко на практике [27]. При комбинированном синергитическом воздействии различные концепции, такие, как предельно допустимые пороговые значения отдельных факторов, стали неприемлемы. Например, два фактора, имеющие значения существенно менее своих предельно допустимых уровней, вместе могут приводить к последней стадии стресса и болезням [13, 18].

Таким образом, развитие такой новой технологии, как термоядерная энергетика, приводит к появлению новых подходов в системе (технике) безопасности, в частности, к разработке новых методик и технических средств контроля. Изучение восприимчивости человека к магнитным полям (есть эксперименты, где человек чувствует поле в 10 тыс. раз меньше геомагнитного [2]) может только усилить этот процесс.

Ранее при проектировании термоядерного реактора ИНТОР уже обращали внимание на опасность для персонала воздействия электромагнитных полей. В реакторном зале и прилегающих помещениях ИТЭРа постоянное магнитное поле превышает 10 мТл, магнитное поле обладает большим градиентом, максимально около 1 Тл/м, как по радиусу, так и по высоте, что существенно затруднит индивидуальный и инспекционный контроль [30]. Контролировать время пребывания t в определенных полях B при таком градиенте чрезвычайно трудно, поэтому появилась необходимость в разработке индивидуального прибора для контроля произведения индукции на время пребывания. При использовании сверхпроводящих магнитных систем магнитное поле будет существовать и в перерывах между импульсами, т.е. почти постоянно. Поэтому при проведении определенных работ не исключается кратковременное периодическое пребывание персонала в местах, где индукция постоянного магнитного поля выше 10 мТл, что обуславливает необходимость индивидуального контроля магнитного поля (величины Bt) и определения зональности помещений ИТЭРа.

С точки зрения физики и техники для получения термоядерной температуры в системах с магнитным удержанием наиболее эффективным является метод нагрева плазмы энергией электромагнитного поля радиочастотного диапазона. Необходимым оборудованием для диагностики плазмы является лазер. Поэтому эти виды излучения также следует контролировать.

Предельно допустимый уровень электромагнитных полей. Такой уровень при работе с постоянными магнитами составляет 100 Гс (10 мТл) на руки, кисти рук, ноги, голову, все тело [31]. Однако при его установлении не учитывались работы с большими магнитами.

В соответствии с отраслевыми методическими рекомендациями [32, 33] временная регламентация работ в постоянном магнитном поле для одного человека в смену $Bt = 60 \text{ мТл} \cdot \text{ч}$ при $B < 100 \text{ мТл}$.

Обоснованность отраслевых рекомендаций [32] подтверждают биологические эксперименты и последующее нормирование Министерства обороны СССР [34]. Рекомендации Министерства энергетики США приведены в работах [5, 7]. Немного измененные (более смягченные) рекомендации США на Станфордском линейном ускорителе [30]. Все эти рекомендации еще раз подтверждают вывод о том, что необходимо индивидуально контролировать Bt .

Из сравнения данных [32] и [5, 7, 30] следует, что рекомендации в США менее жесткие, примерно в 10—100 раз ниже принятых в России. Это объясняется тем, что подход к нормированию электромагнитных полей в США основан на энергетической концепции воздействия, в то время как в России не допускается работа в полях с индукцией постоянного магнитного поля более 100 мТл даже при кратковременном воздействии.

Рекомендации Международного комитета по неионизирующей радиации (МКНР) при работе с ВЧ- и СВЧ-излучением приведены в работе [6].

В отличие от постоянного магнитного поля ВЧ-излучение хорошо экранируется, поэтому основной рекомендацией в этом случае является экранирование пультного помещения, устранение щелей, сокращение времени пребывания персонала в местах, где поля превышают допустимый уровень. Представляет интерес изучение условий труда персонала, использующего терминалы ЭВМ и телевизоры, которые широко применяются в термоядерных исследованиях. Известно, что терминалы и телевизоры являются также источниками рентгеновского и ультрафиолетового излучения. Рентгеновское излучение на расстоянии 5 см от дисплеев максимально достигает 0,5 мР/ч, в среднем составляет 0,04—0,05 мР/ч [35]. Однако наличие рентгеновского излучения налагает более жесткое ограничение на ВЧ- и СВЧ-излучение. Согласно исследованиям, проведенным Ленинградским институтом радиационной гигиены и Институтом гигиены труда и профзаболеваний АМН СССР, в ГОСТ 12.1.006-76 «Электромагнитные поля радиочастот. Допустимые уровни и требования к контролю» было внесено изменение № 1, по которому допустимая плотность потока энергии ВЧ-излучения снижена в 10 раз при наличии рентгеновского излучения или высокой температуры, т.е. она не должна превышать 1 Вт/м^2 ($0,1 \text{ мВт/см}^2$). Тогда в соответствии с ГОСТом [36] требуется снижение энергетических параметров в 10 раз, что в свою очередь уменьшит предельно допустимый уровень по напряженности электрического и магнитного поля в 3,3 раза. Поэтому к безопасности персонала, использующего персональные ЭВМ и телевизоры, необходимо также подходить с точки зрения комбинированного воздействия факторов ионизирующей и неионизирующей радиации. Необходимо учесть также, что персонал в быту может попадать под воздействие электромагнитного поля телевизоров, компьютеров, средств связи и информации и т.д. Измерения [35] показали, что спектр ВЧ-излучения терминалов почти сплошной в диапазоне от 1 кГц до 200 МГц. Предельно допустимый уровень для профессионалов на этот диапазон частот по электрической составляющей будет равен $\sim 10 \text{ В/м}$ [36].

Для предотвращения развития утомления и создания оптимальных условий труда операторов ЭВМ (пользователей персональных компьютеров) в ГНЦ РФ — Институте биофизики предложен комплекс организационно-технических, санитарно-гигиенических и эргономических требований [35], которые являются существенным дополнением к методическим рекомендациям [32].

В соответствии с ГОСТом 12.1.006-76 для СВЧ-излучения нормативная энергетическая нагрузка равна $2 \text{ Вт} \cdot \text{ч}/\text{м}^2$ ($200 \text{ мкВт} \cdot \text{ч}/\text{см}^2$) для всех случаев облучения, исключая облучение от вращающихся и сканирующих антенн. Максимальная плотность потока энергии для СВЧ-излучения не должна превышать $10 \text{ Вт}/\text{м}^2$ ($1 \text{ мВт}/\text{см}^2$). Однако в соответствии с дополнением № 1 указанного ГОСТа при наличии рентгеновского излучения или высокой температуры воздуха в рабочих помещениях (выше 28°C) плотность потока энергии не должна превышать $1 \text{ Вт}/\text{м}^2$ ($100 \text{ мкВт}/\text{см}^2$), что еще более ужесточает нормы в России по сравнению с рекомендациями МКНР.

Необходимо также учесть возможность воздействия на персонал СВЧ-излучения плазмы из щелей в торе, диагностическом оборудовании (циклотронное излучение) с длиной волны около 1 мм и частотой 1000 ГГц.

Для питания ИТЭРа необходима значительная электрическая мощность (около десятков МВт). Такая мощность обуславливает наличие интенсивных электрических и магнитных полей промышленной частоты (50 Гц). В настоящее время указанные электромагнитные поля присущи и оборудованию АЭС [37]. Поэтому при эксплуатации будущих термоядерных электростанций электромагнитные поля могут еще возрасти, и их воздействие также необходимо учесть.

Предельно допустимые уровни на электрическое поле 50 Гц указаны в ГОСТе 12.1.002-84. «Электрические поля промышленной частоты. Допустимые уровни напряженности и требования к проведению контроля на рабочих местах». Уже в настоящее время среди персонала АЭС, например, обслуживающего открытые распределительные устройства энергоустановок или электросварочное оборудование, можно выделить группы, попадающие под преимущественное воздействие магнитных полей промышленной частоты. При этом следует руководствоваться российскими (советскими) регламентирующими документами [38, 39], для которых нет аналогов за рубежом.

Принятые предельно допустимые уровни на лазерное излучение изложены в санитарных нормах и правилах устройства и эксплуатации лазеров [40] и отраслевом стандарте ОСТ 95 10069-84. «Требования безопасности при работе с лазерами».

Требования по безопасности к помещениям ИТЭРа. В соответствии с регламентацией работ в постоянных магнитных полях [32] помещения ИТЭРа следует разделить на помещения постоянного пребывания персонала в магнитных полях ($B < 10 \text{ мТл}$), ограниченного (временного) ($10 < B < 100 \text{ мТл}$ и $Bt = 60 \text{ мТл} \cdot \text{ч}$) и необслуживаемые ($B > 100 \text{ мТл}$).

В дополнении к требованиям СП АС-89 толщину защиты для ИТЭРа предлагается рассчитывать исходя не только из мощности эквивалентной дозы P , но и индукции магнитного поля B , напряженности электрического поля E , магнитного поля H и плотности потока энергии СВЧ-излучения I [35]. До сдачи ИТЭРа в эксплуатацию должна быть проверена эффективность радиационной защиты и качество ее монтажа. Если при этом выявятся места с превышением P , B , E , H и I над проектными, обнаруженные дефекты должны быть устранены. Необходимо учесть, что экранирование постоянного магнитного поля может вызвать нежелательные искажения поля внутри токамака. Поэтому основными защитными мероприятиями в реакторном зале являются контроль, автоматизация и механизация работ.

Система контроля. Рекомендован технический (приборный) контроль: индивидуальный, инспекционный и в некоторых случаях постоянный магнитных полей, инспекционный ВЧ-, СВЧ- и лазерного излучения, а также медицинский. В виде отраслевых рекомендаций [32] разработано техническое задание на приборы инспекционного контроля для измерения квазипостоянного магнитного поля (диапазон индукции $0,01 \text{ мТл} — 10 \text{ Тл}$, длительность импульса $0,1 — 10$ с и более), импульсного ($0,01 \text{ мТл} — 10 \text{ Тл}$, $1 \text{ нс} — 0,1 \text{ с}$), импульсного ВЧ- и СВЧ-излучения (длительность импульса $1 \text{ мкс} — 10 \text{ с}$, диапазон частот $60 \text{ кГц} — 300 \text{ МГц}$ — диапазон напряженности магнитного поля $0,1 \text{ А/м} — 100 \text{ кА/м}$, электрического $1 \text{ В/м} — 10 \text{ кВ/м}$, $300 \text{ МГц} — 1000 \text{ ГГц}$ — диапазон плотности потока энергии $10 \text{ мкВт}/\text{см}^2 — 1000 \text{ мВт}/\text{см}^2$).

В качестве временной меры разработаны устройства, в частности, на основе преобразования сигнала для визуализации на запоминающем осциллографе. Используются приборы KG-600 (Япония) с погрешностью 2% для измерения магнитных полей, NFM-1, FSM (Германия) с погрешностью 10% — ВЧ-излучения, Ф4355, Ф4356 (Россия) и запоминающие осциллографы С8-15, С8-20 (Россия) импульсных магнитных полей, лазерное излучение регистрировалось с помощью прибора ИЛД-2 (Россия).

Наличие на ИТЭРе резкого градиента постоянных магнитных полей обуславливает необходимость индивидуального контроля. В работе [41] обосновано создание системы индивидуального контроля постоянного магнитного поля по типу индивидуальной дозиметрии ионизирующей радиации. В ГНЦ РФ — Институте биофизики совместно с РНЦ «Курчатовский ин-т» разработан индивидуальный дозиметр магнитного поля [35], который успешно апробирован на действующих термоядерных установках.

Была рассмотрена аналогия магнитного дозиметра с дозиметрами ионизирующего излучения, величины B с мощностью дозы ионизирующего излучения, на основе чего предложен принцип индивидуального комбинированного дозиметра ионизирующего и неионизирующего излучения. Возможно, такой универсальный прибор будет легче создать на базе уже имеющихся разработок приборов, регистрирующих мощность дозы и дозу ионизирующего излучения.

Принцип измерения модуляции рекомендовано использовать в дозиметрах неионизирующего излучения. Есть приборы, измеряющие модуляцию сигналов при любых ее видах, например, модулятор фирмы «Маркони».

С учетом концепции информационного воздействия электромагнитных полей было дополнительно предложено измерять модуляцию Δf за период пульсаций T : $\Delta f/T = 1/T\Delta t_0$, где Δt_0 — длительность пульсации магнитного поля. Предполагается, что или работающий совершает однотипные движения в постоянном магнитном поле или воздействует импульсное магнитное поле с определенным периодом между импульсами.

Медицинский контроль предполагает контроль заболеваемости персонала и населения, установление зависимости воздействия факторов и состояния здоровья персонала и населения, проведение оздоровительных мероприятий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Плеханов Г.Ф. Три уровня механизмов биологического действия низкочастотных ЭМП. — В сб.: Биологические механизмы и феномены действия низкочастотных и статических ЭМП на живые системы, Томск, 1984, с. 3—8.
2. Биогенный магнетит и магниторецепция. М.: Мир, 1989, т. 2, с. 340—382.
3. Кеннет Р., Гай А. Биологическое влияние МКВ-излучения. — В мире науки, 1986, вып. 11, с. 4—13.
4. Методические рекомендации «Гигиена труда и профилактика неблагоприятного действия магнитных полей на работающих». М., Минздрав СССР, 1973. 24 с.
5. Alpen E. Magnetic field exposure guidelines. — In: Proc. Biomagn. Effects Workshop. LBL-7452, 1978.
6. IRPA. Guidelines on limits of exposure to radio frequency electromagnetic fields in frequency range from 100 kHz to 300 GHz. — Health Phys., 1988, v. 54, № 1, p. 115.
7. Magnetic fields. WORLD HEALTH organization, Geneva, 1987, p. 197.
8. Гаркави Л.Х., Квакина Е.Б., Лупичев Л.Н. Роль адаптационных реакций в самоорганизации живых систем с позиции термодинамики неравновесных процессов. — В сб.: Механизмы биологического действия электромагнитных излучений. Пушино, 1987, с. 74—75.
9. Голант М.Б. Об использовании амплитудной модуляции для повышения эффективности работы аппаратуры, применяемой для информационных воздействий электромагнитных колебаний на живые системы. — Электронная техника. Сер. Электроника СВЧ, 1982, № 8, с. 6—7.
10. Девятков Н.Д., Голант М.Б. Особенности частотно-зависимых биологических эффектов при воздействии электромагнитных излучений. — Там же, № 12, с. 46—50.
11. Девятков Н.Д., Голант М.Б. Радиофизические аспекты использования в медицине энергетических и информационных воздействий электромагнитных колебаний. — Там же, 1981, № 9, с. 43—50.

12. Квакина Е.Б., Гаркави Л.Х., Уколова М.А. Управление состоянием организма на основе адаптационных реакций. — Вопросы мед. электроники, 1984, № 5, с. 46—51.
13. Методические рекомендации «Повышение сопротивляемости организма с помощью адаптационных реакций тренировки и активации на разных уровнях реактивности организма. Активационная терапия». Ростов-на-Дону, Минздрав СССР, 1985. 14 с.
14. Fluctuation 1/f and tretment of information in biological systems. — Biophys., 1987, v. 27, № 5, p. 206.
15. Шеннон К. Работы по теории информации и кибернетики. М.: Мир, 1963, с. 33.
16. Acceleration of reactions exposure from magnetic fields. — New Sci., 1986, № 105, p. 30.
17. Турова Т.Ф. Влияние ЭМП промышленной частоты на показатели белой крови. — В сб.: Биологические механизмы и феномены действия низкочастотных и статических ЭМП на живые системы. Томск, 1984, с. 112—113.
18. Power frequency field and biological stress. — In: 18th Annual Hanford Life Sci. Symp., 1979.
19. Gabor D. Communication theory and physics. — Phil. Mag., 1950, v. 2, № 7.
20. Лебедев Д.С., Левитин Л.В. Перенос информации электромагнитным полем. — В сб.: Теория передачи информации. М., 1964, с. 5—20.
21. Yamamoto S. Transmission of information by the arterial blood stream with particlura reference to carbon dioxide. — Biophys. J., 1962, № 2, p. 143.
22. Bugiarelo G. Biorheology information theory and cybernetics. — Biorheology, 1973, v. 10, p. 117—127.
23. Пресман А.С. Электромагнитные поля и живая природа. М., 1968, с. 264.
24. Biological aplication of the statistical concept used in the Second Law. — J. Ther. Biol., 1983, v. 105, № 1, p. 103—106.
25. Теория информации в медицине. Минск: Беларусь, 1974, с. 46—76.
26. Проблемы донозологической гигиенической диагностики. Матер. Всес. конф. Л., 1989. 328 с.
27. Егорова М.С., Малинина В.И., Пархоменко Г.М., Фомин Г.В. К вопросу о комбинированном действии ионизирующих и неионизирующих излучений на термоядерных установках. — В сб.: Методолог. аспекты гигиенических исслед. сочетанного и комбинированного воздействий. М., 1986, с. 152—158.
28. Методика энтропийной оценки воздействия магнитных полей на персонал по лейкоцитарным формулам крови. ИБФ МЗ СССР, № Б-4587, 1985. 11 с.
29. Фомин Г.В. Информационные характеристики электромагнитного поля, воздействующего на некоторые системы организма человека. Тез. докл. I Всес. биофиз. съезда. Т. 2. М., 1982, с. 279.
30. Holland D. Occupational Magnetic Field Exposure Draft, Aug. 14, 1995.
31. Предельно допустимые уровни воздействия постоянных магнитных полей при работе с магнитными устройствами и магнитными материалами СН-1742-77. М., 1978.
32. Отраслевые методические рекомендации «Регламентации работ в магнитных полях для персонала термоядерных установок и реакторов». Утв. нач. ЗГУ при МЗ СССР, 1986.
33. Пархоменко Г.М., Кочетков О.А., Фомин Г.В. Проблема гигиены труда в термоядерной энергетике. — Гигиена труда и профзаболевания, 1988, № 2, с. 1—4.
34. Магнитное поле. Сб. научных работ Куйбыш. мед. ин-та. Вып. 15. Куйбышев, 1987, с. 169—170.
35. Разработка критерия радиационной безопасности персонала термоядерных установок. Безопасность работ в высокочастотных полях для персонала, использующего ЭВМ. Отчет Института биофизики, № Б-4732, 1989. 24 с.
36. Стандарт СЭВ. Электромагнитные поля радиочастот. СТ СЭВ 5801-86.
37. Фомин Г.В. Магнитное и электрическое поле на открытых распределительных устройствах АЭС. — Гигиена и санитария, 1983, № 2, с. 85.
38. ПДУ магнитных полей частот 50 Гц СН-3206-85.2. Харьков, Минздрав СССР, 1986.
39. Методические указания по гигиенической оценке основных параметров полей частотой 50 Гц СН-3207-85. Харьков, Минздрав СССР, 1986.
40. Санитарные нормы и правила эксплуатации лазеров. М., Минздрав СССР, 1979.
41. Фомин Г.В., Смирнова Н.С., Мартынюк Ю.Н. Расчет относительной энтропии лейкоцитарной формулы как методика оценки преднозологических состояний персонала. — В сб.: Проблемы донозологической гигиенической диагностики. Л., 1989, с. 235—236.