

# Определение дозы воздействия (пример ионизирующих излучений)

Санитарно-гигиенические оценки условий труда по уровням вредных факторов рабочей среды требуют определения дозы воздействия. Как правило, она определяется непрямыми измерениями – необходимы специальные методики вычисления по результатам серии последовательных замеров. Возможность применения регулярных, жестко заданных методик ограничена постоянными рабочими местами со стабильно повторяющимся воздействием. В общих случаях непостоянных рабочих мест с нестабильными режимами воздействия требуются непрерывные измерения в течение рабочего дня, что, как правило, оказывается неоправданно сложным по практическим соображениям. В работе обсуждается методика определения доз воздействия для реальных условий, когда работники случайно перемещаются между различными производственными участками, а источники вредных факторов включаются в случайные моменты времени и действуют со случайной интенсивностью. Предлагается рассматривать перемещения работников как последовательность испытаний Бернулли с вероятностной экспозицией. Найдено, что результирующее распределение вероятности задается биномиальным законом. Помимо средних значений дозы вероятностный подход позволяет оценить неопределенности измерений типа *A* и *B*. Достоверность результатов проверяется при сравнении отличия среднего значения результатов измерений со средноквадратическим отклонением. Результатам измерений можно доверять, если первое меньше второго.

## **Ключевые слова:**

*условия труда, вредные факторы, статистические оценки, неопределенность измерений.*

**Г.В.Федорович**

(ООО «НТМ-Защита», г. Москва)

Многие действующие гигиенические нормативы ограничивают дозовую нагрузку вредных факторов внешней среды. В общем виде доза – это количественная характеристика эффектов, метрика которых представляет собой совокупный индекс воздействия – взвешенное по времени суммирование интенсивности экспозиции. Гипотеза о том, что последствия токсикологического воздействия (доза  $D$ ) определяются произведением концентрации ( $C$ ) вещества на длительность (время  $T$ ) его введения, приписывается Ф.Хаберу (*Fritz Haber*):  $D = C \cdot T$ . Простота и наглядность соотношения между  $D$ ,  $C$  и  $T$  привели к популярности закона Ф.Хабера у токсикологов. К середине прошлого века представления о дозе как составляющей соотношения «доза–эффект» стали использоваться в исследованиях эффектов ионизирующих и неионизирующих излучений, пылевого и акустического воздействия и других факторов внешней среды. В настоящее время результаты таких исследований положены в основание Федерального Закона

№ 426-ФЗ от 28.12.2013 [1] о нормировании воздействия вредных производственных факторов (далее – ВПФ). Для конкретизации предмета далее ограничимся задачей охраны труда (далее – ОТ) в производственных условиях.

Концепция «доза–эффект» неоспорима. В общем виде доза – это количественная характеристика действия вредного фактора. Уровень воздействия определяется видом фактора, его интенсивностью и продолжительностью воздействия. Прежде всего, невозможно общее определение «дозы» – анализ эффектов акустического шума, например, принципиально отличается от анализа пылевого воздействия и т. д. [2].

Определение дозы воздействия отдельных факторов – это проблема, стоящая перед исследователями в области медицины труда. Для некоторых видов ВПФ (например, электромагнитных полей) механизм воздействия неясен, и доза вводится по аналогии в расчете на то, что это понятие будет уточнено по мере углубления понимания процесса воздействия на организм.

Более того, измерения дозы многих ВПФ в условиях реального производства представляются трудно выполнимыми из-за постоянно меняющейся производственной обстановки. Однократные измерения дают только мгновенный снимок ситуации, а для постоянного индивидуального мониторинга требуется слишком большое количество сложного оборудования и обслуживающего его высококвалифицированного персонала. В качестве альтернативы предлагается измерять не нормируемую величину, а нечто, что должно быть пересчитано в нее. Немного, однако, ясности относительно методов пересчета одного в другое.

Оценка дозы по результатам разовых измерений нетривиальна. Из-за комплексного характера работ по ОТ и их большого экономического значения выбор системы контроля

за условиями труда необходимо основывать на базовых особенностях воздействия ВПФ, которые позволяют определить общие подходы к методике выполнения дозовых измерений. Ниже в качестве ВПФ выбрано ионизирующее излучение (далее – ИИ), однако, с точностью до терминологии, концепция методики выполнения дозовых измерений остается общей и для других ВПФ, и для бытовых условий.

### 1. Дозы воздействия ИИ

Основные подходы к обеспечению радиационной защиты профессионалов и населения от воздействия ИИ содержатся в рекомендациях Международной Комиссии по Радиационной защите. Рекомендации готовятся и пересматриваются на основе актуальных научных представлений о радиационном воздействии на человека и окружающую среду. Они предназначены для национальных и международных органов, ответственных за регулирование радиационной безопасности, а также специалистов в области радиационной безопасности и защиты человека и окружающей среды при использовании источников ИИ в промышленности, медицине и при научных исследованиях.

В нормативных документах РФ эти рекомендации детализируются и конкретизируются. Так, в Приказе [3] приведен Перечень измерений, относящихся к сфере государственного регулирования. В нем в пп.20-26 перечислены виды измерений ИИ: объемной активности материалов, плотности потоков  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  и рентгеновского излучений. Отмечается (п.21) необходимость оценки индивидуального эквивалента дозы излучений, однако метод пересчета результатов измерений ИИ в дозу не определяется. В остальных пп. требуется измерение интенсивности ИИ. Как правило, эту операцию можно считать прямым измерением – результат считывается с экрана сред-

ства измерения (далее – СИ), оно может быть выполнено в соответствии с методикой, внесенной в техническую документацию на СИ. Вообще говоря, измерение дозы воздействия ИИ, что требуется для санитарно-гигиенического контроля, к прямым измерениям не относится, т. к. предусматривает измерение времени воздействия. Считается, что прямые измерения дозы, полученной отдельными органами или всем телом каждого работника, можно выполнить с помощью индивидуальных дозиметров (далее – ИД), носимых на теле в течение периода контроля, однако здесь требуется указать количество и места ношения ИД, решить вопросы контроля правильности ношения ИД относительно применяющихся средств индивидуальной защиты и т. д. Согласно документу [4], ответственным за радиационный контроль является лицо, назначаемое приказом по организации. Радиационный контроль осуществляется в соответствии с утвержденной руководителем организации программой, устанавливающей правила проведения дозиметрического контроля персонала. Ясно, что во всей стране такой подход не обеспечит требуемое единство методических подходов и полноту обеспечения радиационной безопасности.

Очевидно, понимая тупиковый характер ситуации с нормированием ВПФ, Минтруд РФ в обоснование Федерального Закона [1] выпустил Методику проведения специальной оценки условий труда [5], в которой ясно и недвусмысленно указано (Приложение № 19) на дозу ИИ как на единственный (и одновременно обязательный) нормируемый параметр. В зависимости от него определяется класс (подкласс) условий труда.

В этом документе нормируемый параметр ИИ рассматривается как результат оценок максимальной потенциальной эффективной дозы излучения (далее – МПД), которая может быть получена за календарный год

при работе с источниками ИИ в стандартных условиях на конкретном рабочем месте:

$$МПД = K \cdot MD,$$

где  $MD$  – мощность амбиентной дозы внешнего облучения органа на рабочем месте, определенная по данным радиационного контроля (единицы мкЗв/ч).

Если  $МПД$  измерять в единицах мЗв/год, то  $K = 1,7$  (считаем 1700 часов в году). При этом предполагается, что характер облучения одинаков для всех производств, он не меняется в течение рабочей смены и от смены к смене в течение года. Если это не так, и величина  $MD$  меняется либо из-за изменения активности источника ИИ, либо в результате перемещения работника с одного рабочего места на другое (с другой  $MD$ ) при выполнении им производственных операций, нормируемая величина  $МПД$  определяется как сумма величин  $МПД_i$ , взвешенных по временным интервалам  $\Delta t_i$ , на которых  $МПД_i$  постоянны.

Можно утверждать, что измерения по определенным, жестко заданным алгоритмам, могут быть корректны, только если работники подвергаются более-менее регулярному воздействию ИИ на постоянных рабочих местах с регулярно чередующимися сменами режимов облучения. В общем случае регулярные методики выполнения измерений [4,5] неприменимы для непостоянных мест, состоящих из различных производственных участков, ИИ на которых представляет собой смену разнородных событий. В этих случаях непрерывные измерения требуются каждую рабочую смену в течение года, что, как правило, оказывается задачей неоправданно трудоемкой по практическим соображениям для сколь угодно «людных» производств и «вариабельной» работы источников ИИ. Действительно, для вполне «скромных» масштабов (сотни) численности работников и количеств (десятки за смену) режимов облучения каждого из них, суммы, определяющие  $МПД$ , будут насчитываться

вать сотни тысяч слагаемых в год, что делает соответствующие расчеты неприемлемо трудными. В этом отношении мало что изменится, если потребовать ношение на теле работника индивидуальных дозиметров, как это предлагается в [4] (см. выше).

В общем случае целесообразен другой подход, изначально рассматривающий оценку доз как статистическую задачу и использующий вероятностные методы ее анализа.

## 2. Определение референтных значений

Стоит рассмотреть строгое решение абстрактной задачи о воздействии ИИ. Реально такой подход не работает, но результат можно будет использовать в качестве референтного при оценках адекватности реальных (приближенных) методов.

2.1. Введем некоторые базовые понятия, использующиеся для описания ситуации с воздействием ИИ.

Работник трудится на своем **рабочем месте** (далее – РМ), определяемом согласно [6] как место постоянного или временного пребывания работника в процессе трудовой деятельности. «Все места, где работник должен находиться или куда ему необходимо следовать в связи с его работой и которые прямо или косвенно находятся под контролем работодателя». В этом отношении РМ могут быть ассоциированы с работником. Последующее относится к одному работнику, определяет его ин-

дивидуальный «профессиональный маршрут» по заданным для него РМ.

РМ может состоять из нескольких производственных участков [6]: «Места возможного нахождения персонала при выполнении им работ, связанных с эксплуатацией и ремонтом оборудования». Именно здесь следует контролировать рабочую среду. С этой точки зрения они представляют собой [7] **контролируемые зоны** (далее – КЗ), отмечаемые ниже индексом  $j$ .

Производственное оборудование является локализованным источником ИИ, отмечаемым индексом  $k$ ; за ним должно быть установлено наблюдение. Необходимо знать уровни излучения в активных интервалах работы этого оборудования. Вообще говоря, в рутинных режимах работы эти данные можно взять из технической и технологической документации, однако при этом необходимо быть уверенным в том, что реальная работа совпадет с регламентными требованиями. Это не всегда так, поэтому наблюдения требуются хотя бы с целями контроля за источником.

2.2. В любом случае необходим задокументированный регламент работы источника ИИ. Он может иметь вид, приводимый ниже в табл.1. Предполагается, что источник включается 5 раз за смену (ее длительность  $T_0 = 8$  час) в случайные моменты времени  $T_{in}$ , работает в интервале (случайном) времени  $\Delta T$  и выключается в моменты  $T_{fin} = T_{in} + \Delta T$ .

**Табл.1.** Регламент работы источника ИИ.

$i$	$Q_A$ (мкЗв/час)	$T_{in}$ (час)	$T_{fin}$ (час)	$\Delta T$ (час)	$D_A$ (мкЗв)
1	15	0,10	1,32	1,22	18,25
2	9	1,75	2,70	0,95	8,55
3	43	3,68	4,55	0,87	37,27
4	70	5,13	5,87	0,73	51,33
5	88	6,57	7,23	0,67	58,67

В табл.1 активные интервалы пронумерованы индексом  $i$  ( $i = 1 \dots 5$ ),  $Q_A$  – измеряемая в непосредственной близости от источника интенсивность ИИ (мкЗв/час, как выше),  $D_A = Q_A \times \Delta T$  – экспозиционная доза ИИ. Суммарная (за все время работы источника  $T_s = 4,43$  час) экспозиционная доза составляет  $D_{tot} = 174,07$  мкЗв. Источник можно характеризовать двумя средними значениями интенсивности излучения:

- за смену  $\langle Q_0 \rangle = D_{tot}/T_0 = 21,76$  мкЗв/час;
- за время работы источника  $\langle Q_s \rangle = D_{tot}/T_s = 39,3$  мкЗв/час.

2.3. Воздействие ИИ на работника зависит от относительного расположения КЗ и источника ИИ. Для ориентировки целесообразно составить план производственного помещения с указанием относительного расположения источника ИИ и КЗ. Пример плана приведен на рис. 1.

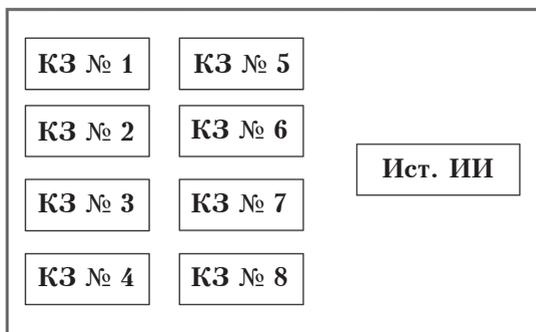


Рис.1. План производственного помещения.

Табл.2. Характеристики КЗ.

$j$	Дист., м	$K_{oc}$	$\Delta t$ , час	$D_t$	$D_t/K_{oc}$
1	6,25	38	1,03	14,25	0,38
2	6	36	1,42	10,95	0,30
3	6	36	1,28	5,27	0,15
4	6,25	38	1,02	35,83	0,94
5	4,25	18	1,07	49,00	2,72
6	4	16	0,38	4,67	0,29
7	4	16	1,27	60,13	3,76
8	4,25	18	0,53	0,00	0,00

Коэффициент  $K_{oc}$  ослабления ИИ при распространении от источника к КЗ следует измерять. При оценках ниже ослабление считаем пропорциональным квадрату расстояния ( $D_{ист}$ ) до каждой  $j$ -й КЗ ( $j = 1 \dots 8$ ). Эти значения  $K_{oc}$  приведены в табл.2 (столбец 3).

В столбце 4 табл.2 даны длительности последовательных работ в соответствующей КЗ. Предполагается, что всю смену работник занят, перерывы на перемещение из одной КЗ в другую минимальны, так что сумма всех  $\Delta t$  равна рабочей смене  $T_0 = 8$  час.

В столбце 5 табл.2 приведены результаты расчетов экспозиционных доз ИИ в тех временных интервалах, когда в соответствующей КЗ производились работы. Они получаются в результате суммирования функции  $Q_A(t)$  из табл.1 по соответствующим временным интервалам  $\Delta t$  из табл.2.

$$D_t = \sum_j [Q_A/K_{oc}]_j \cdot \Delta t_j. \quad (1)$$

При распространении от источника до КЗ интенсивность ИИ уменьшается в  $K_{oc}$  раз (различные величины для каждой КЗ), экспозиционная доза ИИ, дошедшего до КЗ, приведена в столбце 6 табл.2. Суммируя эти дозы по всем временным интервалам (строкам табл.2), определим суммарную дозу, полученную работником за смену:  $D_{tot} = 8,54$  мкЗв. Это строгий результат, полученный с учетом особенностей излучения, распространения и воздействия ИИ.

2.4. Из приведенного примера следует по крайней мере два практически важных вывода.

2.4.1. Интенсивность ИИ в КЗ можно и целесообразно определять, контролируя излучение в источнике, с учетом заранее определенных (желательно, измеренных) коэффициентов ослабления ИИ при распространении от источника к КЗ. Это позволяет ограничить себя одним регистратором ИИ вместо размещения их в каждой из КЗ.

2.4.2. Наибольшие затруднения представляет синхронизация измерения ИИ с интервалами работы отдельного работника во всех КЗ, входящих в состав его РМ. Даже если работники подвергаются более-менее регулярному воздействию ИИ на постоянных рабочих местах с регулярно чередующимися сменами режимов источника ИИ, количество комбинаций превосходит реальные возможности контроля. Его практически невозможно организовать для сколько-нибудь многочисленного рабочего коллектива, в котором работники случайно занимают различные КЗ, а источник ИИ включается в случайные моменты времени и работает со случайной интенсивностью. Здесь необходимы упрощенные методы выполнения измерений. Далее обсуждается один из таких методов, а результат (1) используется в качестве референтного при оценках его адекватности.

### 3. Основы статистических оценок

Опишем возможный статистический подход к проблеме оценки дозы ИИ. Отметим, что при этом появляется возможность расширения диапазона приложений такого подхода.

Включение-выключение источника ИИ и переходы из одной КЗ в другую можно рассматривать как случайные события. Анализ результатов наложения таких событий требует задания их вероятностных характеристик.

Для источника ИИ такой характеристикой является вероятность  $P_s$  обнаружить его

активным. Она равна отношению суммарного времени работы источника  $T_s = 4,43$  час к длительности рабочей смены  $T_0$ :  $P_s = T_s/T_0$  (пп.2.2,2.3). Для разобранный выше (разд.2) примера  $P_s = 0,55$ .

Для оценки математического ожидания  $M[Q_A]$  уровня ИИ, воздействующего на работника, следует суммировать взвешенные по времени вклады интенсивности излучения для каждого интервала активности источника. Это приводит к использованию выборочной средней дозы излучения  $D_{tot} = 174,07$  мкЗв для оценки средней (за время работы источника, п.2.2) интенсивности излучения ИИ:  $M[Q_A] = \langle Q_s \rangle = 39,3$  мкЗв/час.

Одна КЗ от другой отличается величиной ослабления интенсивности ИИ при распространении от источника до КЗ. Переход к статистическому описанию явления предполагает, что вместо коэффициента ослабления для каждой КЗ следует использовать среднее значение  $\langle I/K \rangle = 0,043$  для оценки дозы ИИ в любой из КЗ. Математическое ожидание  $M[Q_A]$  следует уменьшить в  $\langle I/K \rangle = 0,043$  раз, чтобы оценить эффективный/средний уровень ИИ в области КЗ. Он равен:

$$Q_{eff} \approx \langle I/K \rangle \cdot M[Q_A] \approx 1,7.$$

За время  $T_0$  рабочей смены работник  $N$  раз переходит из одной КЗ в другую, так что средняя длительность работы в КЗ равна  $T_w = T_0/N$ . Эти переходы можно рассматривать как последовательность испытаний Бернулли [8] с вероятностью  $P_s$  попасть под действие ИИ. Вероятность того, что из  $N$  случаев работы в контролируемой зоне работник  $n$  раз попадет под действие ИИ равна:

$$P_N(n) = \frac{N!}{n!(N-n)!} P_s^n (1-P_s)^{N-n}. \quad (2)$$

Среднее время экспозиции равно:

$$\langle T \rangle = T_w \cdot \sum_n n \cdot P_N(n). \quad (3)$$

Сумма по  $n$  в (3) представляет собой математическое ожидание  $E[n]$  числа попаданий

под действие ИИ в КЗ [8]. Для биномиального распределения  $E[n] = N \cdot P_s$ . Подставляя это в формулу (3) для  $\langle T \rangle$ , получим:

$$\langle T \rangle = T_w \cdot N \cdot T_s / T_0 = T_s = 4,43 \text{ час.} \quad (4)$$

Экспозиционная доза равна произведению  $\langle T \rangle$  на эффективный уровень ИИ, воздействующего на работника:

$$D_{eff} = \langle T \rangle \cdot Q_{eff} = 7,53 \text{ мкЗв.}$$

Сопоставляя эту оценку с истинным значением дозы  $D_{tot} = 8,54 \text{ мкЗв}$ , видим, что ошибка измерения  $\approx 12\%$ . Показательно, что эта ошибка не связана с погрешностью СИ. Более того, эта чисто организационная погрешность результата (неопределенность типа *B* по терминологии стандарта [9]) меньше, чем допустимая инструментальная погрешность измерения ИИ (согласно [3] в области ОТ необходимы СИ с погрешностью не более  $30 \div 50\%$ ).

Анализ последовательности рассуждений при вероятностном подходе к проблеме открывает возможность дальнейшего упрощения методики выполнения измерений экспозиционной дозы. Если регистрировать излученную дозу ИИ  $D_{tot} = 174,07 \text{ мкЗв}$  и учесть ее ослабление в  $\langle I/K \rangle = 0,043$  раз, то получим полную дозу на РМ (включающем все 8 КЗ):

$D_{eff} = 7,48 \text{ мкЗв}$ . Так как работник все время находится в КЗ этого РМ, это и будет оценка полной дозы, полученной за всю рабочую смену. Этот результат практически не отличается от найденного выше в рамках вероятностного подхода, однако требует гораздо меньше усилий для его получения. Практически необходимо знать только средний (по КЗ) коэффициент ослабления ИИ и полную дозу излучения вблизи источника. Первый можно измерить только один раз (периодически контролируя его устойчивость), для оценки дозы требуется дозиметр ИИ, работающий весь рабочий день в одном месте (вблизи источника).

#### 4. Замечания о неопределенности результатов

Статистический подход к измерению доз дает возможность оценить неопределенность результатов. Это и есть отмеченная выше возможность расширения диапазона приложений. Вообще говоря, неопределенность – это отдельная самостоятельная проблема. Она вполне заслуживает отдельного рассмотрения. Здесь ограничимся краткими замечаниями.

Методика оценки неопределенности, которая рекомендуется в стандарте [9], существенно основана на предположении о нормальном распределении вероятностей результатов измерений. Это может быть не так для небольших объемов выборки из генеральной совокупности результатов замеров. Более того, случайная величина может не порождаться никакой генеральной совокупностью. Даже если сама измеряемая величина набирается из генеральной совокупности, распределение возможных значений (например, выборочного среднего) может не соответствовать распределению признака в какой-то простой генеральной совокупности [10]. Предлагаемая в [9] оценка неопределенности не подходит, например, для распределения вероятностей по Пуассону, для которого ожидаемое значение и дисперсия равны. Именно такое распределение вероятностей больше подходит для описания измерения экспозиционных доз, чем нормальное.

В соответствии с требованиями Стандарта [9] (п.5.1.3), методики выполнения измерений должны обеспечивать показатели точности и функционального назначения, установленные в исходных требованиях на их разработку. Целью измерений является получение оценки истинного значения измеряемой величины. Понятие погрешности измерений как разности между результатом измерений и истинным (действительным) значением измеряемой величины используется для описания точности измерений в НД ГСИ по метрологии.

В настоящее время для выражения точности измерений обычно используют понятие неопределенности измерений [9]. Неопределенность понимается как неполное знание значения измеряемой величины, и для количественного выражения этой неполноты вводится распределение вероятностей возможных (обоснованно приписанных) значений измеряемой величины. Таким образом, параметр этого распределения (также называемый неопределенность) количественно характеризует точность результата измерений.

Неопределенности делятся на два типа [11]: тип *A*, оцениваемый статистическими методами и тип *B* нестатистической природы. При измерениях доз ВПФ присутствуют оба типа неопределенности и оба сложны для оценок.

**A-тип:** это, как правило, инструментальная неопределенность. В случае ИИ это погрешность СИ (30÷50%). Что мешает использовать ее в качестве основы для оценки:

- 1) небольшая выборка ( $N = 5 \div 10$  событий);
- 2) при увеличении объема выборки распределение вероятностей Бернулли сходится не к нормальному распределению, а к распределению Пуассона [8]. Для него дисперсия равна математическому ожиданию и рекомендуемый «для охвата» доверительный интервал слева ограничен отрицательными аргументами, что не поддается разумной интерпретации [8].

**B-тип:** это организационная неопределенность, и она плохо описывается в общих понятиях. Предыдущее показывает, что она не менее существенна, чем неопределенность типа *A*.

Схема Бернулли, использованная выше в качестве статистической модели набора экспозиционной дозы, характеризуется вероятностью  $P_s = 0,55$ ; размером выборки  $N = 8$ ; матожиданием  $E[n]$  числа попаданий под действие ИИ:  $E[n] = N \cdot P_s = 4,4$ ; дисперсией  $D = N \cdot P_s \cdot (1 - P_s) = 1,98$ . Мерой неопределенности можно считать среднее квадратическое

отклонение (корень из дисперсии). В рассмотренном случае среднее квадратическое отклонение  $\sigma = 1,41$ .

Последнее очень важно для определения правдоподобности изучаемого явления в сравнении с предсказанным теорией значением: если среднее значение результатов измерений заметно отличается от предсказанных теорией значений (при большом значении среднее квадратического отклонения), то полученные значения или метод их получения следует перепроверить. В рассмотренном примере отклонение (ошибка измерения) характеризуется величиной 12%, это позволяет использовать результаты измерений.

Распределение асимметрично, для него характерно то, что с вероятностью  $P_s$  случайная величина может быть меньше матожидания на величину  $N \cdot \text{Sqrt}[(1 - P_s)/P_s] = 7,2$  и с вероятностью  $(1 - P_s)$  быть больше матожидания на величину  $N \cdot \text{Sqrt}[P_s/(1 - P_s)] = 8,84$ .

## 5. Оформление результатов вероятностных оценок. Практические рекомендации

Полученные выше соотношения для вероятностных оценок доз воздействия ВПФ определяют перечень параметров рабочего процесса, необходимых для таких оценок.

Далее краткие формулировки рекомендаций:

- 1) Необходим перечень оборудования, которое может быть источником ВПФ. В качестве характеристики ВПФ следует брать интенсивность воздействия. Это может быть концентрация пыли или химического загрязнителя в воздухе рабочей зоны. Если исследуется ИИ, оно характеризуется интенсивностью излучения  $Q_A(t)$ , соответствующим образом взвешенной по времени. Для неионизирующих электромагнитных излучений это плотность потока энергии в соответствующем диапазоне частот. В общем, это те факторы, которые

определяют скорость набора дозы воздействия ВПФ.

2) Необходимо описание видов ВПФ, интенсивностей их генерации, хронометраж работы оборудования – количества  $K$  включений  $M_k$  и длительностей интервалов его работы  $t_k$ . Эта информация содержится в технической документации на производственное оборудование и в технологических картах его применения.

3) Необходимо перечисление РМ и входящих в их состав КЗ. Полезно составить план производственного помещения с указанием взаимного расположения оборудования, которое может быть источником ВПФ и всех КЗ (числом  $J$ ), в которых может проявляться действие этих ВПФ. Реально одна и та же КЗ может входить в состав различных рабочих мест, что также целесообразно отметить на плане. Последнее сопряжено с определением и фиксацией количества  $N_j$  «заходов» работника в  $j$ -ю КЗ и длительностей  $t_j$  работы в ней.

4) Перечисленные параметры работы оборудования  $\{M_k; t_k\}$  и деятельности работника  $\{N_j; t_j\}$  контролируются при исследованиях условий труда и непосредственно используются в оценках дозы воздействия ВПФ на него.

5) Наиболее трудоемко измерение уровней ВПФ от всех источников во всех КЗ. Прежде всего, это большой массив (номинально  $K \times J$ ) измерений. Оптимальным было бы измерение уровней ВПФ в каждой КЗ при поочередно включаемом отдельном источнике. Может оказаться, однако, что такие измерения сложно организовать. В этом случае придется использовать косвенные данные – относительное повышение уровней ВПФ в каждой КЗ при включении источника и понижение при его выключении.

Эту трудоемкую работу, однако, следует провести один раз, и в дальнейшем можно использовать результаты по  $Q_{jk}$ , хронометри-

руя только режимы работы оборудования и работников в обследуемых КЗ. Собственно, исследования условий труда сводятся в этих случаях к хронометражу рабочего времени и не столь частым контрольным измерениям уровней ВПФ в КЗ.

Предложенное в настоящей работе – исследование «профессионального маршрута» отдельного работника. Общая производственная программа измерений может быть сокращена, если есть возможность выделить группы работников, выполняющих схожую работу и подвергающихся, как можно ожидать, приблизительно одинаковому воздействию ИИ в течение рабочего дня (группы равного радиационного воздействия). Последние могут быть сформированы разными способами, например, на основании таких признаков, как профессия работников, их функциональные обязанности, занимаемая должность, место выполнения работ. Для вынесения окончательного решения о составе группы могут быть использованы результаты измерений.

## 6. Заключение

Подводя итоги изложенному, отметим следующее.

Дозиметрический метод является основным методом гигиенического контроля производственных условий в большинстве развитых стран.

Основное, что должно быть зафиксировано – ситуация с условиями труда на РМ: источники ВПФ, коэффициенты ослабления при распространении до КЗ, профессиональные маршруты, хронофотография рабочего дня.

Анализируемая модель сильно упрощена, но она может служить инструментом оценки более сложных методик. В любом случае не следует воспринимать содержание статьи как законченную теорию гигиенического контроля условий труда. Это всего лишь изложение тех принципов и идей, какими следо-

вало бы руководствоваться при построении такой теории.

То, что предложено выше – не окончательно. Многое (возможно, все) можно сделать по-другому, но любые переделки следует начинать со структуры воздействия ВПФ на работника. Она может отличаться от последовательности/схемы Бернулли, но не может отсутствовать совсем. Иначе произойдет запутывание банальных проблем и превращение действительно сложных проблем в банальности. Ложное начало предопределяет неоднозначность в постановке и проведении измерений и расхождения в результатах произвольно выполненных исследований.

Практические трудности в значительной степени могут быть уменьшены, если использовать все возможности современной измерительной техники. Это облегчает процесс проведения и обработки измерений и повы-

шает их точность. Современные цифровые регистраторы, сконструированные на основе микропроцессоров и цифровых технологий, берут на себя выполнение массы рутинных расчетов, приводят к изменениям способов работы с приборами. Не представляет затруднений произвести замеры по всему комплексу нормируемых параметров для нескольких КЗ, запомнить результаты в памяти вместе с датой, временем и комментарием, а затем провести необходимую дополнительную обработку на компьютере. Тем самым можно избежать неопределенности по типу *B*, т. е. вдвое улучшить результат.

Нет дефицита в качественных приборах, однако при выборе средств измерения параметров, указанных в нормативных актах, следует учитывать как сами обязательные требования нормативных документов, так и «требования жизни», вытекающие из условий применения.

## Литература

1. Федеральный закон РФ «О специальной оценке условий труда» от 28.12.2013 № 426-ФЗ.  
URL: <https://sudact.ru/law/federalnyi-zakon-ot-28122013-n-426-fz-o/> (дата обращения: 28.12.2022).
2. Федорович Г.В. Зависимость доза–эффект в гигиене труда (риск-ориентированный подход). Saarbruken (Deutschland): Palmarium Academic Publishing, 2017, 200 с. DOI: 978-620-2-38060-7.  
URL: <https://www.morebooks.de/shop-ui/shop/product/978-620-2-38060-7> (дата обращения: 17.08.2021).
3. Приказ Минздравсоцразвития РФ от 09.09.2011. № 1034н. Перечень измерений, относящихся к сфере государственного регулирования обеспечения единства измерений и производимых при выполнении работ по обеспечению безопасных условий и охраны труда, в том числе на опасных производственных объектах. Приложение № 1.
4. Ионизирующее излучение, радиационная безопасность. Организация и проведение индивидуального дозиметрического контроля. Методические указания МУ 2.6.1.3015-12. Федеральная служба по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека. М., 2012.

5. Приказ Минтруда РФ от 24.01.2014. № 33н. Об утверждении методики проведения специальной оценки условий труда, классификатора вредных и (или) опасных производственных факторов, формы отчета о проведении специальной оценки условий труда и инструкции по ее заполнению. М., 2014.
6. ГОСТ Р 56906-2016. Организация рабочего пространства. М.: Стандартинформ, 2017.
7. Приказ Минтруда РФ от 29.10.2021. № 774н. Об утверждении общих требований к организации безопасного рабочего места. М., 2021.
8. Крамер Г. Математические методы статистики. М.: Мир, 1975. 648 с.

## Determination the Exposure Dose (an Example of Ionizing Radiation)

Fedorovitch Gennady (NTM-Defence Ltd, Moscow, Russia)

**Abstract.** Sanitary and hygienic assessments of working conditions according to the levels of harmful factors in the working environment require the determination of the exposure dose. As a rule, it is determined by indirect measurements - special calculation methods are needed based on the results of a series of successive measurements. The ability to apply regular, rigidly defined techniques is limited to permanent jobs with stably repetitive exposure. In general cases of non-permanent workplaces with unstable exposure regimes, continuous measurements are required during the working day, which, as a rule, turns out to be unnecessarily difficult for practical reasons. The paper discusses a method for determining exposure doses for real conditions, when workers randomly move between different production sites, and sources of harmful factors turn on at random times and act with random intensity. It is proposed to consider the movements of workers as a sequence of Bernoulli tests with probabilistic exposure. It is found that the resulting probability distribution is given by the binomial law. In addition to average dose values, the probabilistic approach makes it possible to estimate measurement uncertainties of types A and B. The reliability of the results is checked by comparing the difference between the average value of the measurement results and the standard deviation. Measurement results can be trusted if the first is less than the second.

**Key words:** *working conditions, harmful factors, statistical estimates, measurement uncertainty.*

Г.В.Федорович (д.ф.-м.н., тех. директор) – ООО «НТМ-Защита», г. Москва.

Контакты: e-mail: fedorgv@gmail.com; тел. +7 (495) 500-03-00.