

УДК 51.7:612.014.482

Б. В. ДЗЮНДЗЮК, канд. техн. наук, Т. И. СТЕПАНОВА

**АНАЛИЗ ПОНЯТИЯ «ДОЗА ВРЕДНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ»
И СВЯЗАННЫХ С НИМ АСПЕКТОВ**

В литературе по гигиене труда часто применяется термин «доза». Это понятие используется, например, при оценке воздействия химических веществ ионизирующего излучения. Делаются попытки применить дозовый подход для оценки воздействия электромагнитного излучения (ЭМИ) [1]. Применение дозового принципа существенно упрощает принятие решений о допустимости условий среды для человека, степени риска и т. д. Однако даже при наличии лишь одного фактора внешней среды на рабочем месте, оцениваемого только одним параметром, попытка сформулировать понятие «доза», адекватно связанное с физиологическим эффектом, часто наталкивается на ряд трудностей.

Например, для ЭМИ естественно в качестве параметра, характеризующего данное воздействие, выбрать мощность излучения (или мощность поглощения) P , а в качестве дозы мощности — $D = Pt$, где t — время экспозиции. Для случая $P \neq \text{const}$ соответственно

$$D = \int_{t_1}^{t_2} P(t) dt.$$

Здесь $[t_1, t_2]$ — период экспозиции.

Такие попытки делались в работе [2].

Однако практика показала необходимость ряда оговорок введения поправочных коэффициентов и т. д., так как, например, при низкой мощности воздействие не ощущается независимо от интервала экспозиции. Кроме того, на практике часто встречается воздействие на человека одновременно нескольких факторов среды. Авторам неизвестны источники, в которых обсуждается понятие «доза» в этих ситуациях.

Таким образом, анализ современного состояния вопроса приводит к необходимости подробно исследовать понятие «доза вредного воздействия» с целью его формализации и обобщения. При этом следует учитывать, что анализ понятия, находящегося на этапе становления, представляет интерес и с точки зрения изучения принципов мышления человека.

Поверхностный анализ применения термина «доза» показывает, что имеется в виду оценка количества вещества, выделенной или поглощенной энергии или результата воздействия при заданных условиях. Оценки могут быть даны удельные (для единицы объема, площади поверхности или массы) и для всего объекта или источника воздействия. Однако в любом случае доза обладает свойствами аддитивности и инвариантности во времени.

Свойство аддитивности заключается в том, что если мы разделим рассматриваемый интервал времени на два, то доза за весь интервал равна сумме доз за части интервала.

Свойство инвариантности состоит в том, что доза воздействия за определенный интервал времени определяется только воздействием в течение этого интервала.

Фактор внешней среды может влиять на состояние человека негативным и позитивным образом. В задачах охраны труда обычно рассматриваются только те факторы, которые влияют негативно (вредные факторы). В этом случае доза воздействия всегда положительна, а в случае отсутствия или неощутимого воздействия она равна нулю.

Исходя из указанных свойств, построим формализованное определение дозы.

Пусть воздействие внешней среды характеризуется n -мерным вектором параметров x , зависящим от времени, т. е. $x = x(t)$. Область изменения времени обозначим D_t . При этом компонентами $x^{(i)}(t)$ вектора $x(t)$ могут быть величины различной природы,

например характеристики одного фактора (мощность и частота электромагнитного излучения), а также набора факторов (температура воздуха, атмосферное давление, уровень шума, концентрация вредных веществ). Они могут изменяться и непрерывно, и дискретно (например, может быть параметр «наличие воздействия ЭМИ», равный единице, если воздействие имеет место, и нулю — в противном случае). Существенным для $x^{(i)}(t)$ является только то, что они характеризуют воздействие среды на оператора (или состояние среды) в фиксированный момент времени t .

После выбора номенклатуры показателей $x^{(i)}(t)$ можно определить класс допустимых вектор-функций $x(t)$. В него войдут все функции $x(t)$, удовлетворяющие имеющимся ограничениям на функции $x^{(i)}(t)$ и их сочетания. Обозначим такой класс X .

Введем на классе X функционал D . Этот функционал зависит от параметров и от двух моментов времени t_1, t_2 ($t_1 < t_2$).

Таким образом, $D = D(x(t); t_1, t_2); x(t) \in X$.

Рассмотрим следующие аксиомы для функционала D .

A1. Аддитивность.

$\forall x(t) \in X, \forall \{t_1, t_2, t_3\}$ таких, что $t_1 < t_2 < t_3$ и $[t_1, t_2], [t_2, t_3] \subset D_t$, имеет место равенство $D(x(t); t_1, t_2) + D(x(t); t_2, t_3) = D(x(t); t_1, t_3)$.

A2. Инвариантность во времени.

$\forall [t_1, t_2] \subset D_t, \forall \tau: [t_1, t_2] \subset D_t$ и $[t_1 + \tau, t_2 + \tau] \subset D_t$ (сдвиг интервала времени на τ не выводит из D_t), имеет место следующее утверждение: $\forall x_1(t), x_2(t) \in X: \forall t \in [t_1, t_2], x_2(t) = x_1(t + \tau) \Rightarrow D(x_2(t); t_1, t_2) = D(x_1(t); t_1 + \tau, t_2 + \tau)$.

A3. Положительность.

$\forall x(t) \in X, \forall t_1, t_2$ таких, что $[t_1; t_2] \subset D_t$, имеет место неравенство $D(x(t); t_1, t_2) \geq 0$.

A3'. Отрицательность.

$\forall x(t) \in X, \forall t_1, t_2$ таких, что $[t_1; t_2] \subset D_t$, имеет место неравенство $D(x(t); t_1, t_2) \leq 0$.

Функционал D , удовлетворяющий аксиомам A1, A2, назовем дозовым функционалом, а $D(x(t); t_1, t_2)$ — измеренной функционалом D дозой воздействия при интенсивности $x(t)$ на интервале $[t_1, t_2]$. В случае выполнения дополнительно аксиомы A3 (A3') назовем D позитивным (негативным) дозовым функционалом и соответственно $D(x(t); t_1, t_2)$ — дозой вредного (полезного) воздействия.

Как видим, аксиомы A1—A3 являются формализацией указанных выше свойств дозы. В самом деле, свойство A1 отражает тот факт, что дозы суммируются, свойство A2 означает, что доза за интервал определяется состоянием среды только во время этого интервала и не зависит от предыстории. Аксиома A3 отражает свойство дозы для факторов безусловно вредных.

Очевидно, что если $D(x(t); t_1, t_2)$ — дозовый функционал, то $\alpha D(x(t); t_1, t_2)$ — также дозовый функционал $\forall \alpha \in \mathbb{R}$. Если

$D_1(x(t); t_1, t_2)$ и $D(x(t); t_1, t_2)$ — дозовые функционалы, то $D_1(x(t); t_1, t_2) + D_2(x(t); t_1, t_2) = (D_1 + D_2)(x(t); t_1, t_2)$ также будет дозовым функционалом.

Таким образом, функционалы, удовлетворяющие аксиомам А1, А2, образуют линейное пространство. Следовательно, для одного и того же класса функций X можно построить бесконечное множество дозовых функционалов.

В частности, если $g(x)$ — скалярная функция вектора x , $g(x) \geq 0 \forall x$ и $\int_{t_1}^{t_2} g(x(t)) dt$ сходятся, то

$$\Phi_g(x(t); t_1, t_2) = \int_{t_1}^{t_2} g(x(t)) dt \quad (1)$$

будет позитивным дозовым функционалом. Выполнение аксиом А1 — А3 очевидно.

Из-за многообразия дозовых функционалов встает вопрос о сужении их пространства.

Естественным будет использовать для выбора дозовых функционалов информацию о действии факторов среды на организм человека.

Рассмотрим следующий частный случай. Для ЭМИ установлены максимальные времена пребывания человека при различных значениях плотности потока энергии (ППЭ).

Обозначим соответствующие времена через τ_i , а мощности — через P_i . Естественно будет предположить, что «максимально допустимые дозы», измеренные с помощью одного и того же дозового функционала, равны между собой.

Таким образом, $D(P_i; 0, \tau_i) = \text{const}$. Если выберем дозовый функционал в виде (1), то будет иметь место соотношение

$$g(P_i) \tau_i = \text{const} \text{ или } \frac{g(P_i)}{g(P_j)} = \frac{\tau_j}{\tau_i}.$$

Следовательно, согласование дозового функционала с нормативными значениями максимально допустимого времени пребывания под воздействием ЭМИ с заданными ППЭ привело к дополнительным ограничениям на значения функции g .

Отметим еще один аспект рассмотренного примера. Очевидно, что с увеличением P должна возрастать и доза воздействия за одно и то же время. Таким образом, функция $g(P)$ должна быть монотонно возрастающей.

Выводы, сделанные при рассмотрении приведенного примера, могут быть применены для дальнейшего формирования представлений о понятии «доза».

Дозовый функционал D порождает для каждого интервала $[t_1, t_2] \subset D_t$ отношение частичной упорядоченности на классе X .

Для двух функций $x_1(t)$ и $x_2(t)$ можно принять $x_1(t) \underset{[t_1, t_2]}{D} > x_2(t)$.

если $D(x_1(t); t_1; t_2) \geq D(x_2(t); t_1; t_2)$. Очевидно, что если $x_1(t) \underset{D}{>} x_2(t)$ и $x_1(t) \underset{D}{>} x_2(t)$, то $x_1(t) \underset{D}{>} x_2(t)$. С другой стороны, в классе X может существовать естественная частичная упорядоченность. Если в этом смысле $x_1(t)$ мажорирует $x_2(t)$ на интервале $[t_1, t_2]$, будем обозначать этот факт

$$x_1(t) \underset{X}{>}_{[t_1, t_2]} x_2(t).$$

Пусть, например, компоненты $x(t)$ — концентрации в воздухе различных вредных веществ. В этом случае можно считать, что

$$x_1(t) \underset{X}{>}_{[t_1, t_2]} x_2(t), \text{ если } \forall i x_1^{(i)}(t) > x_2^{(i)}(t) \forall t \in [t_1, t_2].$$

При наличии такой упорядоченности мы должны потребовать согласованности двух отношений порядка: если $x_1(t) \underset{X}{>}_{[t_1, t_2]} x_2(t)$,

$$\text{то } x_1(t) \underset{D}{>}_{[t_1, t_2]} x_2(t).$$

Для приведенного выше примера и задания дозового функционала по формуле (1) условие согласованности порядков будет означать, что функция g монотонно не убывает по каждому аргументу.

Возможен также подход к выбору дозового функционала, основанный на сравнении дозы с эффектом. Рассмотрим этот вопрос подробнее.

Пусть наряду с дозовым функционалом D на X задан функционал эффекта $\Phi(x(t); t_1, t_2)$, характеризующий ухудшение состояния объекта (оператора) под воздействием, характеризующимся вектор-функцией $x(t)$ в период $[t_1, t_2]$. Функционал Φ соединяет результат воздействия и результат процессов адаптации и восстановления организма. Поэтому от него нельзя требовать выполнения аксиом А1—А3. Одним из методов выбора дозового функционала является приближение функционала эффекта в пространстве дозовых функционалов, т. е. нужно выбрать функционал D , удовлетворяющий аксиомам А1—А3, такой, что $\forall x \in X, \forall [t_1, t_2] \subset D_t, \forall D'$ -дозового выполняется неравенство

$$|\Phi(x; t_1, t_2) - D(x; t_1, t_2)| \leq |\Phi(x; t_1, t_2) - D'(x; t_1, t_2)|.$$

Рассмотрим выбор такого функционала на примере. Пусть $x(t)$ — интенсивность воздействия; y — состояние организма, и имеет место соотношение $y' + by = ax$ при условии, что $y(t_1) = y_1$. Такая модель широко применяется при исследовании воздействия вредных факторов на биологические системы (см., например, [3]).

Тогда

$$y(t_2) = y_1 e^{-b(t_2-t_1)} + a \int_{t_1}^{t_2} e^{b(t_1-t)} x(t) dt.$$

Видим, что при равных начальных условиях от $x(t)$ зависит $\int_{t_1}^{t_2} e^{b(t_1-t)} x(t) dt$, которое можно рассматривать в качестве функционала эффекта. Докажем, что ему соответствует дозовый функционал $D(x(t); t_1, t_2) = \int_{t_1}^{t_2} x(t) dt$. Предположим, что мы нашли функционал вида $D'(x(t); t_1, t_2) = \int_{t_1}^{t_2} g(x(t)) dt$ (ограничимся такими функционалами, где $g(x) \neq x$).

Тогда найдется такое значение $\tilde{x} = \text{const}$, что $g(\tilde{x}) \neq \tilde{x}$. Для упрощения выкладки примем $t_1 = 0$; $t_2 = t$.

Оценим разность $\Delta = |\Phi(\tilde{x}; 0, t) - D'(\tilde{x}; 0, t)|$

$$\Delta = \left| \int_0^t (e^{-b\tau} \tilde{x} - g(\tilde{x})) d\tau \right|.$$

По формуле Тейлора

$$e^{-b\tau} = 1 - \tau \frac{e^{-b\theta_\tau \tau}}{b}, \text{ где } \theta_\tau \in]0; 1[.$$

$$\text{Отсюда } \Delta = \left| \int_0^t (\tilde{x} - g(\tilde{x})) d\tau - \tilde{x} \int_0^t \tau \frac{e^{-b\theta_\tau \tau}}{b} d\tau \right|.$$

Отметим, что

$$\int_0^t \tau \frac{e^{-b\theta_\tau \tau}}{b} d\tau < \frac{t^2}{2b}; \quad \int_0^t (\tilde{x} - g(\tilde{x})) d\tau = t(\tilde{x} - g(\tilde{x})).$$

Если $\tilde{x} \neq g(\tilde{x})$, то можно выбрать достаточно малое t такое, что $\Delta \approx t(\tilde{x} - g(\tilde{x})) = O(t)$. Если же $g(x) \equiv x$, то

$$\Delta = \left| \int_0^t \tau \frac{e^{-b\theta_\tau \tau}}{b} d\tau \right| = O(t^2).$$

Таким образом, для любой функции $g(x) \neq x$ можно выбрать $x(t) = \tilde{x}$ и t такие, что

$$\left| \Phi(x(t); 0, t) - \int_0^t g(x(t)) dt \right| > \left| \Phi(x(t); 0, t) - \int_0^t x(t) dt \right|,$$

что и требовалось доказать.

Аналогично можно определить дозовые функционалы для других зависимостей эффекта от воздействия.

Предложенные методы формирования дозовых функционалов могут найти применение при определении гигиенических норм для технологических процессов с сочетанием изменяющихся во времени вредных воздействий.

Список литературы: 1. *Давыдов Б. И., Тихончук В. С., Антипов В. В.* Биологическое действие, нормирование и защита от электромагнитных излучений.— М.: Энергоатомиздат, 1984.— 176 с. 2. *Минин Б. А.* СВЧ и безопасность человека.— М.: Сов. радио, 1974.— 214 с. 3. *Методы математической биологии. Книга 7: Методы анализа и синтеза биологических систем управления.*— К.: Вища шк., Головное изд-во, 1983.— 272 с.

Поступила в редколлегию 13.03.86