УДК [53.021:613.648.4]:517

И. Б. Снисар

Государственный научно-технический центр по ядерной и радиационной безопасности, г. Киев, Украина

Зонирование, оптимальное обследование и верификация данных дозиметрии поверхностных полей излучений

Предлагаются оригинальные методики зонирования, оптимизации обследований и верификации данных дозиметрии поверхностных полей ионизирующих излучений. Эти методики дают возможность однозначного решения задач зонирования и маршрутизации обследований упомянутых полей при любом объеме исходных данных, а также возможность верификации данных полевых измерений, полученных при любой сетке измерений и любыми методами.

Ключевые слова: экстремальное поле, предельный закон, зонирование, радиационное обследование, верификация.

І. Б. Снісар

Зонування, оптимальне обстеження та верифікація даних дозиметрії поверхневих полів випромінювань

Пропонуються оригінальні методики зонування, оптимізації обстежень та верифікації даних дозиметрії поверхневих полів іонізуючих випромінювань. Ці методики уможливлюють однозначність розв'язання задач зонування й маршрутизації обстежень згаданих полів за будь-якого обсягу вихідних даних, а також верифікацію даних польових вимірювань, отриманих за будь-якої сітки вимірювань і будь-якими методами.

Ключові слова: екстремальне поле, граничний закон, зонування, радіаційне обстеження, верифікація.

© И. Б. Снисар, 2015

Рассматриваемые в статье методики касаются зонирования, оптимизации обследований и верификации данных дозиметрии полей ионизирующих излучений поверхностного типа, т. е. полей, создаваемых вблизи материальных поверхностей распределенными на них изотропными источниками. Эти методики вытекают из теории экстремального поля (ТЭП), основные положения которой изложены в [1, 2].

Из ТЭП следует, что с любой точкой $\vec{r}_o$ (узловой точкой), где некоторое поверхностное поле $\varphi(\vec{r})$ характеризуется значением φ_o, можно связать виртуальное поле $E_{\pm}(\vec{r}) = \varphi_o e^{\pm k|\vec{r}-\vec{r}_o|}$ (экстремальное поле), которым определяется область допустимых значений $\varphi(\vec{r})$ в соответствии с неравенством (предельным законом)

$$E_{-}(\vec{r}) \le \varphi(\vec{r}) \le E_{+}(\vec{r}). \qquad (1)$$

Параметр k в функции экстремального поля представляет собой предел пространственной неоднородности всех полей поверхностного типа, зависящий от линейного коэффициента ослабления излучения в воздухе и высоты точки наблюдения над излучающей поверхностью [1]. При отрицательном значении k экстремальное поле называется минимальным (E_{-}), а при положительном — максимальным (E_{+}). Множество всех значений $\varphi(\vec{r})$, допускаемых неравенством (1) в данной точке наблюдения (при фиксированном $\vec{r}$), образует так называемый *интервал разрешенных значений* (ИРЗ) поверхностного поля в этой точке $\left[E_{-}(\vec{r}); E_{+}(\vec{r})\right]$, обусловленный узловым значением φ_o.

В том случае, когда известно множество значений $\{\varphi_{oi}\}_n$ поверхностного поля $\varphi(\vec{r})$ в n узловых точках, область его допустимых значений в любой точке наблюдения $\vec{r}$ определяется пересечением областей (1), связанных с каждым узловым значением. Верхняя и нижняя границы этого пересечения соответствуют *многоузловому экстремальному полю*

$$\tilde{E}_{\pm}(\vec{r}) = \begin{matrix}\max\\ \min\end{matrix} \bigcap_{i=1}^{n} \left[E_{-}^{(i)}(\vec{r}); E_{+}^{(i)}(\vec{r})\right], \qquad (2)$$

где $E_{\pm}^{(i)}(\vec{r}) = \varphi_{oi} e^{\pm k|\vec{r}-\vec{r}_{oi}|}$ — одноузловое экстремальное поле, связанное с i-й узловой точкой $\vec{r}_{oi}$.

Предельный закон для полей поверхностного типа, характеризуемых множеством точечных значений, записывается в виде

$$\tilde{E}_{-}(\vec{r}) \le \varphi(\vec{r}) \le \tilde{E}_{+}(\vec{r}). \qquad (3)$$

Зонирование поверхностных полей излучений. Одна из важных задач, решаемых в практике радиационной защиты — определение радиационно-опасных зон в поле излучения. Такие зоны устанавливаются по результатам достаточно детального радиационного обследования как области поля с известными уровнями излучения [3]. В отличие от радиационно-опасных зон, ТЭП позволяет ввести понятие *потенциально опасных* зон, уровни излучения в которых не известны, но объективно могут достигать здесь, в соответствии с имеющимися данными точечных измерений, наибольших (экстремальных) значений.

Потенциально опасные зоны определяются с помощью диаграммы многоузлового экстремального (максимального) поля (2), построенной на множестве имеющихся результатов точечных измерений. При этом в расчет берутся

только те участки диаграммы, которые превышают заданный уровень, принятый в качестве границы безопасности. Проекция этих участков на излучающую поверхность указывает потенциально опасную зону.

На рис. 1 показан пример определения потенциально опасной зоны в поверхностном поле излучения с известными его значениями в пяти точках. Появление человека в этой зоне означает возможность его облучения выше установленного уровня. Знание потенциально опасных зон представляется особенно полезным в тех случаях, когда необходимо установить наиболее безопасные маршруты движения людей в условиях мало известной радиационной обстановки и когда проведение дополнительного радиационного обследования при этом невозможно или нежелательно (например, из соображений экономии средств).

Оптимизация обследований поверхностных полей излучений. Целью любого радиационного обследования является получение информации о существующей радиационной обстановке. В соответствии с принципом оптимизации защиты [4], при проведении радиационных обследований возникает задача выбора наиболее информативного маршрута обследования, который бы обеспечил получение наибольшего объема информации об исследуемом поле излучения при минимальном ущербе, в частности при минимальной протяженности совершаемого маршрута и, следовательно, минимальной дозе облучения дозиметриста. ТЭП дает возможность точного и оптимального, с точки зрения соотношения «информативность — ущерб», выбора маршрутов радиационных обследований при наличии ограниченного числа предварительных данных о радиационной обстановке.

Согласно предельному закону (3), истинное значение поверхностного поля в некоторой точке $\vec{r}$ находится в ИРЗ $\left[\tilde{E}_-(\vec{r});\ \tilde{E}_+(\vec{r})\right]$. С гносеологической точки зрения, ИРЗ — это показатель наших знаний о поле излучения в рассматриваемой точке: чем шире ИРЗ, тем больше неопределенность этих знаний и, наоборот, чем у́же ИРЗ, тем знания точнее. В частности, для узловых точек ширина ИРЗ равна нулю, поскольку значение поля в них определено. Таким образом, точки пространства, характеризуемые наибольшими значениями экстремального

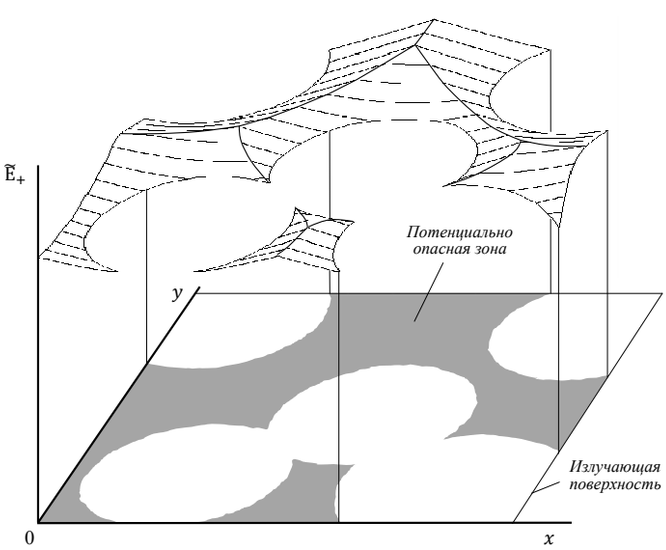

Рис. 1. Пример определения потенциально опасной зоны

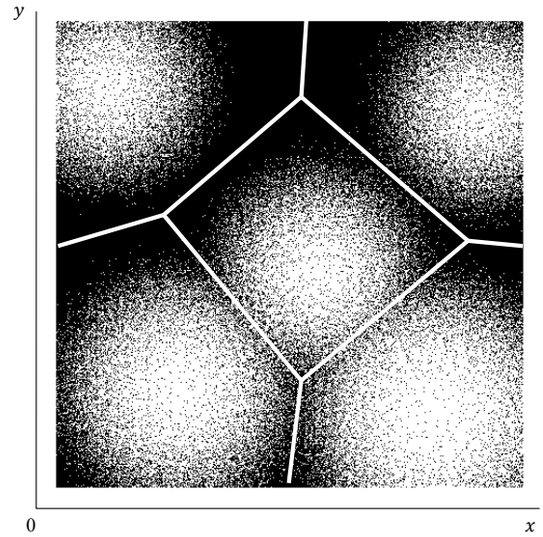

Рис. 2. Пример маршрутной карты радиационного обследования

поля (следовательно, наиболее широкими ИРЗ), указывают места наибольшей неопределенности наших знаний об исследуемом поле, и поэтому маршруты радиационных обследований целесообразно прокладывать именно через эти точки.

Наибольшие значения экстремального поля соответствуют вершинам его диаграммы (рис. 1). Вершины диаграммы имеют протяженный характер и проецируются на излучающую поверхность в сеть непрерывных линий, которая, в свою очередь, служит идеальной картой маршрутов наиболее эффективного (информативного) радиационного обследования.

На рис. 2 показан пример маршрутной карты радиационного обследования (белые линии), которая основана на проекции пятиузлового экстремального (максимального) поля, изображенного на рис. 1.

Верификация данных дозиметрии полей поверхностного типа. ТЭП позволяет аналитическим путем проводить верификацию множества данных, представленного точечными (узловыми) значениями φ_{oi} поверхностного поля излучения, полученными при любых сетках измерений и любыми методами. Критерием верификации при этом служит предельный закон (1), записанный для каждого (i-го) значения рассматриваемого множества ($\varphi \equiv \varphi_{oi}$):

$$E_-^{(ji)} \le \varphi_{oi} \le E_+^{(ji)} \qquad \left(j = 1,2,3,\ldots,n,\quad j \ne i\right), \tag{4}$$

где $E_\pm^{(ji)}$ — экстремальное поле в точке измерения i-го значения, обусловленное каждым из остальных (j-х) значений упомянутого множества.

Смысл этого критерия заключается в том, что имеющееся множество данных репрезентативно в том случае, когда каждое содержащееся в нем значение поверхностного поля принадлежит всем ИРЗ, обусловленным остальными значениями этого множества.

Продемонстрируем применение критерия на простом примере. Пусть по результатам измерений в трех точках, расположенных на одной прямой на расстоянии 1 у. е. друг от друга, получены значения поля $\varphi_{o1} = 2 \cdot 10^{-2}$,

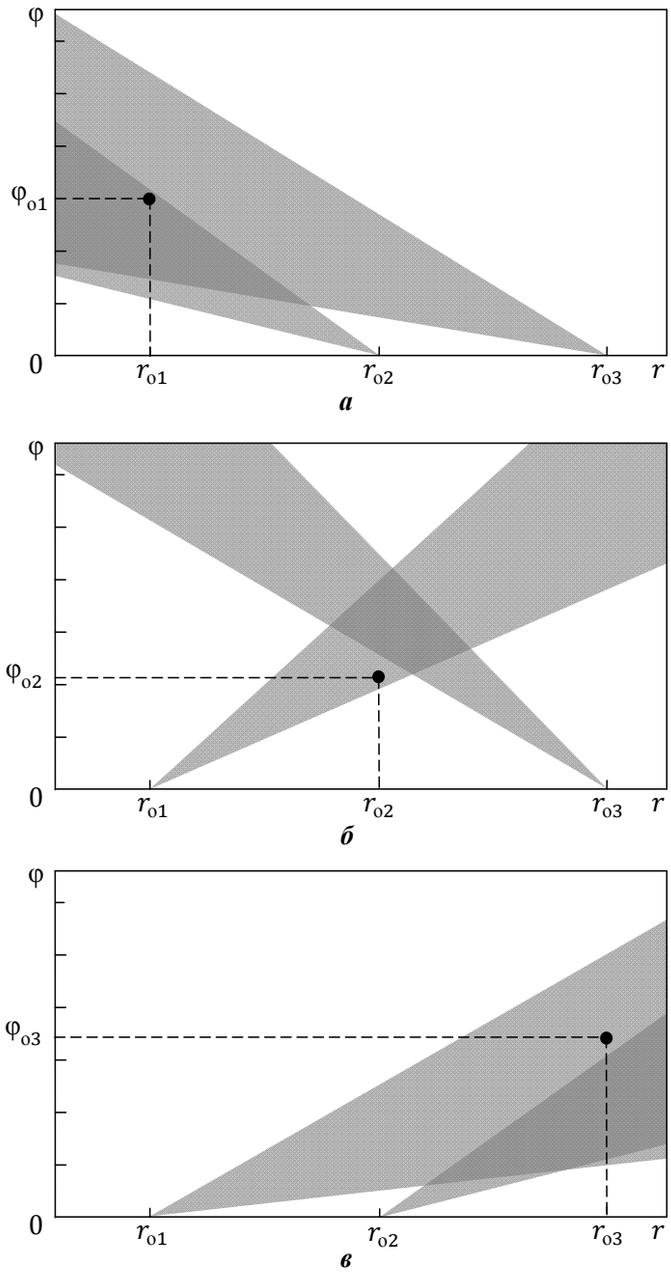

Рис. 3. Пример верификации данных дозиметрии поверхностного поля

$\varphi_{o2} = 8 \cdot 10^{-3}$ и $\varphi_{o3} = 3 \cdot 10^{-2}$ у. е. соответственно. Расчет показывает (для упрощения расчета принято $k = 1$), что значение поля φ_{o1} в точке 1 согласуется с его значениями φ_{o2} и φ_{o3} в точках 2 и 3 соответственно, так как φ_{o1} содержится в ИРЗ, обусловленных φ_{o2} и φ_{o3} (рис. 3, *а*). В то же время значения поля в точках 2 и 3 не согласуются между собой, так как значение φ_{o2} не попадает в ИРЗ, обусловленный значением φ_{o3} (рис. 3, *б*), а значение φ_{o3} не попадает в ИРЗ, обусловленный значением φ_{o2} (рис. 3, *в*). Если известно, что измеренное поле относится к поверхностному типу, то полученный результат верификации означает ошибочность одного из значений φ_{o2} и φ_{o3}, при этом для восстановления репрезентативности имеющегося множества данных необходимо или уточнить «несогласующиеся» значения, или исключить их из рассмотрения. Если же имеющиеся результаты измерений метрологически надежны, то выполненная верификация свидетельствует о «неповерхностном» характере измеренного поля, например о наличии сторонних (находящихся на неизлучающей поверхности) или направленных (неизотропных) источников излучения. В связи с этим полезно отметить, что несогласованность данных, имеющая аномальный характер, свидетельствует о присутствии на излучающей поверхности локального направленного источника излучения. Таким образом, процедура верификации может использоваться как инструмент обнаружения локальных направленных источников в полях излучений поверхностного типа.

Рассмотренный пример верификации может быть легко распространен на сколь угодно большое количество исходных данных, представляющих исследуемое поле. Учитывая, что объем расчетов в процессе верификации возрастает быстрее, чем количество исходных данных, целесообразно разработать специальную компьютерную программу (расчетный код), предназначенную для верификации результатов полевых измерений на основе критерия (4).

Заключение

Построение и последующее исследование математической модели поверхностных полей позволило установить общую закономерность для объектов данного класса и выразить ее в виде так называемого предельного закона — сначала в дифференциальной, а затем в интегральной формах. Попытка интерпретации предельного закона привела к необходимости введения ряда новых понятий и объединению их в рамках теории экстремального поля.

Применение ТЭП к физическим полям ионизирующих излучений показало, что она обладает значительным потенциалом для решения многих прикладных задач в области радиационной безопасности и защиты. Основные приложения ТЭП при этом представлены ранее предложенными методиками [2] экстремального прогноза, оценки погрешности картограмм и определения необходимого объема измерений поверхностных полей излучений, а также изложенными в настоящей статье методиками зонирования, оптимизации радиационных обследований и верификации данных дозиметрии упомянутых полей. Некоторые из перечисленных методик указывают новые пути решения уже известных, классических задач (например, определение объема измерений и зонирование), другие — обеспечивают решение новых, не рассматриваемых ранее задач (например, оценка погрешности картограмм и массовая верификация данных дозиметрии). Круг полезных приложений ТЭП не ограничивается упомянутыми выше методиками и, по-видимому, может быть расширен.

Материалы настоящей статьи, а также статей [1, 2]) могут использоваться эксплуатирующими организациями в деятельности по обеспечению радиационной безопасности, а также регулирующими органами для развития нормативной базы и выполнения экспертиз в области радиационной безопасности.

Список использованной литературы

1. *Снисар И. Б.* Предел пространственной неоднородности поверхностных полей излучений / И. Б. Снисар // Ядерна та радіаційна безпека. — 2014. — № 2(62). — С. 26—28.
2. *Снисар И. Б.* Теория экстремального поля и ее практические приложения / И. Б. Снисар // Ядерна та радіаційна безпека. — 2015. — № 1 (65). — С. 30—33.
3. Перечень зонированных помещений зданий, сооружений и территории промышленной площадки объекта «Укрытие». 24ПН-С / ГСП «Чернобыльская АЭС». — 2009. — С. 6—8.
4. Радиационная безопасность. Рекомендации МКРЗ. Публикация 60 / Пер. с англ. — М. : Энергоатомиздат, 1994. — С. 82—83.

References

1. *Snisar, I. B.* (2014), "Spatial Inhomogeneity Limit for Surface Radiation Fields" [Predel prostranstvennoi neodnorodnosti poverkhnostnykh polei izluchenii], Nuclear and Radiation Safety, No. 2(62), pp. 26—28. (Rus)
2. *Snisar, I. B.* (2015), "Extreme Field Theory and Its Practical Applications" [Teoriia ekstremalnogo polia i yeio prakticheskiie prilozheniia], Nuclear and Radiation Safety, No. 1 (65), pp. 30—33. (Rus)
3. List of Zoned Premises in Buildings, Structures and the Shelter Industrial Site. 24PN-S. Chornobyl NPP [Perechen zonirovanykh pomeshchenii zdanii, sooruzhenii i territorii promyshlennoi ploshchadki obiekta "Ukrytiie". 24PN-S, GSP "Chernobylskaia AES", 2009, pp. 6–8. (Rus)
4. Radiation Safety. Recommendations of the ICRP. Publication 60 [Radiatsionnaia bezopasnost. Rekomendatsii MKRZ. Publikatsiia 60], translation from English, Moscow, Energoatomizdat, 1994, pp. 82–83. (Rus)

Получено 15.06.2015.

ШАНОВНІ ПАНОВЕ!

Передплата сьогодні — один з основних і найбільш зручних для споживача каналів розповсюдження періодики.

ДП «Преса» надає *послуги з організації і проведення передплати періодичних видань* — вітчизняних і зарубіжних газет, журналів, видань журнального типу та книг в Україні та за її межами.

Передплата проводиться за каталогами підприємства, які містять більше 2400 найменувань видань України і понад 7000 тисяч найменувань газет і журналів Болгарії, Великобританії, Іспанії, Італії, Канади, Китаю, Німеччини, Польщі, Росії, США, Узбекистану та інших зарубіжних країн.

Каталоги видаються двічі на рік і постійно доповнюються інформаційними додатками, що містять актуальну інформацію щодо змін порядку передплати тих або інших вітчизняних і зарубіжних видань.

Приймання та оформлення передплати здійснюється у кожному поштовому відділенні України.

Оформити передплату можна також на сайті www.presa.ua і на підставі надісланого редакцією рахунку-фактури на замовлення зацікавлених організацій та окремих осіб.

Редакція журналу «Ядерна та радіаційна безпека» сподівається бачити Вас і Ваших колег серед постійних читачів і авторів цього видання. Передплатний індекс — 37781.