

ФОРМУВАННЯ РАДІАЦІЙНОГО ФОНУ В ПРИМІЩЕННЯХ

© Хоботова Е.Б., Уханьова М.І., 2010

Наведено алгоритм визначення потужності дози на різних відстанях над окремою плитою за експериментально виміряною величиною на довільній відстані. Розроблено математичну модель для розрахунку просторового змінювання потужності експозиційної дози гамма-випромінювання у приміщенні.

The algorithm of dose power determination for different distances from the separate plate with the use of experimentally measured dose power value for arbitrary distance has been presented. The mathematical model for the calculation of space change of gamma-radiation exposure dose power indoors has been worked out.

Основний внесок у дозу опромінення населення доводиться на природні джерела іонізуючого випромінювання. Серед усіх природних джерел випромінювання вагоме місце посідають компоненти радіаційного фону приміщень [1].

Значущість внеску природних радіонуклідів (ПРН) у використовуваних будівельних матеріалах і підстильних ґрунтах під будівлями у величину дози опромінення визначається тим, що дія цих джерел випромінювання має систематичний характер (людина проводить у приміщеннях будівель близько 80 % часу) і таку особливість дії – опромінення в приміщенні відбувається в геометрії 4л. Систематична дія на населення техногенно-підвищеного радіаційного фону виявляється у формі соматико-стохастичних і генетичних ефектів, що спостерігаються і за малих доз [2].

Поле γ -випромінювання в приміщенні створюють природні радіонукліди, що містяться у будівельних матеріалах, що використовуються для спорудження стін і міжповерхових перекриттів. Співвідношення між потужністю поглиненої дози фотонного випромінювання радіонуклідів і їх питомою активністю в будматеріалах залежить від спектрів γ -випромінювання ПРН, властивостей матеріалів, геометричних розмірів приміщення і оточуючих конструкцій [1, 3].

Мета роботи – змоделювати змінюваність потужності експозиційної дози γ -випромінювання від будівельних матеріалів у приміщеннях різної форми.

Розрахунок потужності експозиційної дози в приміщенні, зумовленої радіонуклідами в будівельних конструкціях, – доволі складне завдання. Розроблені методики, які уможливають провести приблизні оцінки цієї величини за наявності в будматеріалах тільки природних радіонуклідів.

Потужність дози γ -випромінювання інтер'єру житла тісно пов'язана з питомою радіоактивністю вихідної сировини, використаної для виробництва будівельного матеріалу.

Аналіз даних [1, 3, 4] свідчить, що питома радіоактивність будівельних матеріалів і сировини для їх виробництва коливається в доволі широких межах – від 7 до 4700 Бк/кг. В останні роки з метою одержання будматеріалів широко використовуються відходи промисловості, багато з яких мають підвищену питому активність ПРН (порівняно із середнім значенням для будматеріалів).

Коливання в широких межах питомої активності будівельних матеріалів і промислових відходів свідчить про те, що і радіаційний фон як у службових, так і у житлових приміщеннях, є різним і по-різному впливає на безпеку життєдіяльності людини [5], оскільки концентрація ПРН у використовуваних будівельних матеріалах визначає величину зовнішньої і внутрішньої складових дози опромінення.

Випромінювання, що створюється будівельними матеріалами, зумовлене наявністю в їх складі насамперед природних радіонуклідів: радію (^{226}Ra), торію (^{232}Th) і калію (^{40}K). Вміст ПРН у будматеріалах визначається вимірюванням їх питомих активностей (C_i , Бк/кг). Для порівняльних

оцінок радіоактивності різних будівельних матеріалів застосовується ефективна питома активність ($C_{\text{еф.}}$), що вимірюється в Бк/кг і визначається за формулою

$$C_{\text{еф.}} = C_{\text{Ra}} + 1,31C_{\text{Th}} + 0,085C_{\text{K}}, \quad (1)$$

де C_{Ra} , C_{Th} , C_{K} – питома активність ^{226}Ra , ^{232}Th і ^{40}K відповідно; 1,31 і 0,085 – вагові коефіцієнти для ^{232}Th і ^{40}K відповідно по відношенню до ^{226}Ra [6].

Якщо будівельна конструкція виготовлена із багатокомпонентних будівельних матеріалів, розрахунки проводяться з використанням середньої ефективної питомої активності ($\bar{C}_{\text{еф.}}$, Бк/кг):

$$\bar{C}_{\text{еф.}} = \frac{\sum (C_{\text{еф.}})_i \cdot m_i}{\sum m_i} = \sum (C_{\text{еф.}})_i \cdot N_i, \quad (2)$$

де $C_{\text{еф.}i}$ – ефективні питомі активності складових багатокомпонентного бетону, Бк/кг; m_i – маси складових багатокомпонентного бетону, кг; N_i – масова частка складових бетону [3, 4].

З урахуванням гамма-фону навколишньої місцевості величина потужності поглиненої дози ($R_{\text{прим.}}$) зовнішнього опромінення в приміщенні сучасних кам'яних будинків становить

$$R_{\text{прим.}} = 0,79\bar{C}_{\text{еф.}}, \text{ нГр/год.} \quad (3)$$

Результати широкомасштабних досліджень потужності дози γ -випромінювання в житлових приміщеннях багатьох країн вказують на те, що в більшості країн вона близька до 70 нГр/год. [1, 3].

Для розрахунку річної ефективної еквівалентної дози γ -випромінювання ($D_{\text{прим.}}$) для людей, які проживають в сучасних кам'яних будинках, запропонована така формула:

$$D_{\text{прим.}} = 4,74\bar{C}_{\text{еф.}}, \text{ мкЗв/рік.} \quad (4)$$

Величина дози, яку одержують за рахунок γ -випромінювання природних радіонуклідів будівельних матеріалів ($\Delta D_{\text{ПРН}}$), розраховується за різницею

$$D_{\text{ПРН}} = D_{\text{прим.}} - 305, \text{ мкЗв/рік,} \quad (5)$$

де 305 мкЗв/рік – це доза, яку одержали б люди, знаходячись весь рік на відкритій місцевості для географічних широт України [1, 3, 5].

За цією методикою ми розрахували потужність поглиненої дози для бетонних приміщень. При цьому розрахунок проводився для трикомпонентного бетону з такими масовими внесками його складових: цемент – 0,2 (в'язуче), відпрацьована формувальна суміш – 0,35 (дрібний наповнювач), шлаковий щебінь – 0,45 (крупний наповнювач).

Для експериментального визначення питомої радіоактивності складових бетону використовувався гамма-спектрометричний аналіз, виконаний за допомогою сцинтиляційного гамма-спектрометра СЕГ-001 "АКП-С", діапазон вимірюваних енергій, γ -випромінювання якого становить від 50 до 3000 кеВ. При цьому досліджувана проба поміщалася у посудину Марінеллі об'ємом 1 л. Час вимірювання активності ПРН в середньому становив 2 год. Межа основної допустимої похибки вимірювання активності для геометрії "Марінеллі" ($P=0,95$) – не більше 25 %. Для обробки результатів вимірювань використовувалося програмне забезпечення Akwin. Експериментальні результати наведено в табл. 1.

Оскільки основний внесок в ефективну питому радіоактивність багатокомпонентного бетону робить саме наповнювач, ми дослідили п'ять зразків доменних шлаків різного походження. Доменний шлак має в своєму складі двох представників радіоактивних родин ^{226}Ra і ^{232}Th (α , γ – випромінювачі) і ^{40}K (β , γ – випромінювач), що не належать до радіоактивних рядів.

Усі досліджені зразки сировинних матеріалів належать до I класу радіаційної небезпеки будівельних матеріалів, оскільки $C_{\text{еф.}}$ не перевищує величини 370 Бк/кг [6]. Подібні матеріали можуть використовуватися в будівництві без обмеження.

Результати розрахунків середньої ефективної питомої активності багатокомпонентного бетону з різними варіантами великого шлакового наповнювача наведено в табл. 2. У цій таблиці наведено результати розрахунків потужності експозиційної дози γ -випромінювання будматеріалів у бетонному приміщенні річної ефективної еквівалентної дози γ -випромінювання та додаткової дози, яку одержують за рахунок γ -випромінювання ПРН бетону.

Таблиця 1

Результати гамма-спектрометричного аналізу складових бетону

№ зразка	Вид матеріалу	C _{эф.} , Бк/кг	Питома радіоактивність, Бк/кг (внесок, %)		
			⁴⁰ K	²²⁶ Ra	²³² Th
1	Відвальний доменний шлак, ВАР "Запоріжсталь"	76,1	134 (69,4)	40,6 (21,0)	18,4 (9,6)
2	Доменний шлак, ВАР "Єнакіївський металургійний завод"	118,4	133 (57,7)	68,8 (29,7)	29,2 (12,6)
3	Гранульований доменний шлак, ВАР "Алчевський металургійний комбінат"	117,6	125 (55,7)	74,1 (33,1)	25,1 (11,2)
4	Гранульований алюмінійвмісний шлак, ТОВ "Екочормет"	94,4	913 (98,4)	8,47 (0,9)	6,34 (0,7)
5	Гранульований доменний шлак, ВАР "АрселорМіттал Кривий Ріг"	122,3	110 (51,2)	78,9 (36,7)	26,0 (12,1)
6	Цемент М 400, ВАР "Кривий Ріг Цемент"	82,8	70,9 (50,1)	50,3 (35,6)	20,3 (14,3)
7	Відпрацьована формувальна суміш, м. Суми	39,4	–	14,2 (42,5)	19,2 (57,5)

Таблиця 2

Розрахункові значення $\bar{C}_{эф.}$, $D_{прим.}$, $\Delta D_{прн}$ для шлакових бетонів

Шлакобетон (№ зразків шлаків відповідає табл. 1)	$\bar{C}_{эф.}$, Бк/кг	$R_{прим.}$, нГр/год.	$D_{прим.}$, мкЗв/рік	$\Delta D_{прим.}$, мкЗв/рік
1	64,60	51,03	306,2	1,20
2	83,63	66,07	396,4	91,4
3	83,27	65,78	394,7	89,7
4	72,83	57,54	345,2	40,2
5	85,38	67,45	404,7	99,7

Середня річна ефективна еквівалентна доза γ -випромінювання для розвинених країн світу становить 350–411 мкЗв/рік [1]. Розраховані дози опромінення в бетонних приміщеннях укладаються у вказаний діапазон. Аналізуючи додаткове γ -випромінювання у приміщенні за рахунок ПРН будівельних матеріалів, також не виявлено перевищення середнього значення $\Delta D_{прн}$ по СНД (100 мкЗв/рік [1]). Проте залежно від виду матеріалів, з яких виготовлені будівельні конструкції, у різних точках об'єму приміщення буде відрізнятися величина потужності експозиційної дози випромінювання.

Отже, на характер формування радіаційного фону будівель здійснює вплив багато обставин, врахувати які без прямого дослідження, не завжди можливо [2]. Для розв'язання поставленої задачі розглядалися приміщення різної форми. На першому етапі була проаналізована змінювана гамма-фону над окремою плитою. Розглядаючи плиту розмірами $A \times B \times C$, виконану з будівельного матеріалу, в якому рівномірно розподілені природні радіонукліди, були прийняті умовності:

- розглядалося тільки гамма-випромінювання, іншими видами випромінювання, ексхалацією родону у цій задачі знехтувано;
- враховувалося поглинання γ -випромінювання під час проходження товщі матеріалу;
- матеріал вважався ізотропним, умови – стаціонарними;
- не враховувалася інтерференція полів від різних джерел;
- дозиметр, за допомогою якого вимірювалася потужність, вважався точковим по відношенню до плити.

Потужність експозиційної дози P (щільність потоку енергії), створювана точковим джерелом (елементарним об'ємом dV) у просторі, зворотно пропорційна до квадрата відстані до нього. На поверхні сфери радіусом R_1 вона становитиме

$$P_1 = \frac{W}{4 R_1^2}, \quad (6)$$

де W – потужність випромінювання.

Відповідно потужність експозиційної дози на поверхні сфери радіусом R_2 становитиме

$$P_2 = \frac{W}{4 R_2^2}. \quad (7)$$

За сумісного вирішення рівнянь (6) і (7) отримаємо величину P_2 :

$$P_2 = \frac{P_1 \cdot R_1^2}{R_2^2}. \quad (8)$$

Тобто, якщо відома потужність дози випромінювання на певній відстані від точкового джерела, то можна визначити її значення на будь-якій більшій відстані. Так, потужність експозиційної дози P_0 , що створюється довільним елементарним об'ємом dV_2 плити (рис. 1) в точці O (за $h \geq R$), дорівнюватиме

$$P_0 = \frac{P_S \cdot R^2}{x^2 + y^2 + z^2}, \quad (9)$$

де P_S – потужність дози в точці S , створювана елементарним об'ємом dV_1 ; R – відстань від елементарного об'єму dV_1 до точки S ; h – відстань від елементарного об'єму dV_1 до точки O ; x , y , z – координати довільної точки O (рис. 1) ($x \neq 0$; $y \neq 0$; $z \neq 0$).

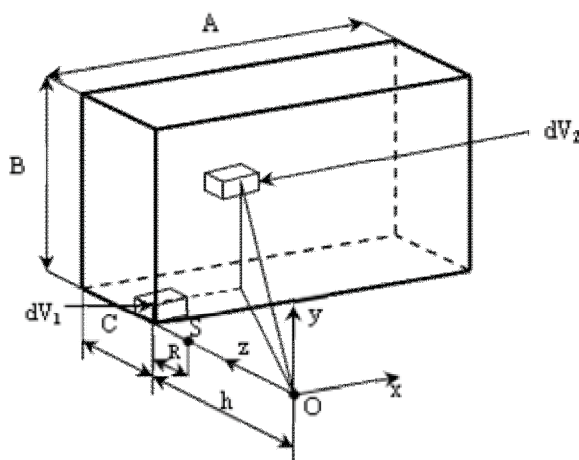


Рис. 1. Система координат для розрахунку потужності експозиційної дози від елементарного об'єму матеріалу

Для визначення потужності дози в точці O (початок координат), створеної усією плитою, пропонується умовно розділити плиту на кінцеву кількість одиничних елементів (дискретних джерел). Усі лінійні розміри далі наведені у відносних одиницях (відношення розміру плити або відстані до відповідного розміру елемента). Потужність дози дорівнюватиме сумі відповідних значень від окремих елементів:

$$P_{0\Sigma} \approx PR^2 \sum_{x=1}^A \sum_{y=1}^B \sum_{z=h}^{H+h} \frac{1}{(x^2 + y^2 + z^2)2^{\frac{g}{d}}}, \quad (10)$$

де P – значення потужності дози γ -випромінювання на відстані R від одиночного елемента; A , B , H – розміри плити, виражені кількістю одиничних елементів уздовж відповідних координат x , y , z

($A \neq 0$; $B \neq 0$; $H \neq 0$); h – відстань між початком координат O і плитою ($h \neq 0$); d – товщина шару напівослаблення матеріалу плити; g – товщина матеріалу плити, яку долає промінь від одиничного елемента до початку координат (точки O), що визначається за співвідношенням:

$$g = \left(\frac{z-h}{z}\right)\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}. \quad (11)$$

$$A := \quad B := \quad H := \quad y_0 := \quad d := \quad R := \quad h := \quad PR^d :=$$

$$\begin{aligned}
 N := & \left[\begin{array}{l} \text{for } x_0 \in 1..A-2 \cdot h \\ \quad \text{for } z_0 \in 1..B-2 \cdot h \\ \\ L \quad L_{x_0, z_0} \leftarrow \sum_{x=-h}^{A-h} \sum_{z=-h}^{B-h} \sum_{y=H}^{H+h} \frac{P \cdot R^2}{\left[(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2 + (z-z_0)^2 \right] \cdot 2} \frac{\left[\sqrt{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2 + (z-z_0)^2} \right] \cdot (y-H)}{(y-y_0)d} + \\ \\ + \sum_{y=-h}^{-1} \frac{P \cdot R^2}{\left[(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2 + (z-z_0)^2 \right] \cdot 2} \frac{\left[\sqrt{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2 + (z-z_0)^2} \right] \cdot y}{(y-y_0)d} \end{array} \right] + \\
 & + \sum_{y=1}^H \sum_{z=1}^{B-2h} \sum_{x=A-2h}^{A-h} \frac{P \cdot R^2}{\left[(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2 + (z-z_0)^2 \right] \cdot 2} \frac{\left[\sqrt{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2 + (z-z_0)^2} \right] \cdot (x-A+2h)}{(x-x_0)d} + \\
 & + \sum_{x=-h}^{-1} \frac{P \cdot R^2}{\left[(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2 + (z-z_0)^2 \right] \cdot 2} \frac{\left[\sqrt{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2 + (z-z_0)^2} \right] \cdot x}{(x-x_0)d} + \\
 & + \sum_{x=-h}^{A-h} \sum_{y=1}^H \sum_{z=-h}^{-1} \frac{P \cdot R^2}{\left[(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2 + (z-z_0)^2 \right] \cdot 2} \frac{\left[\sqrt{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2 + (z-z_0)^2} \right] \cdot z}{(z-z_0)d} + \\
 & + \sum_{z=B-2h}^{B-h} \frac{P \cdot R^2}{\left[(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2 + (z-z_0)^2 \right] \cdot 2} \frac{\left[\sqrt{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2 + (z-z_0)^2} \right] \cdot (z-B+2h)}{(z-z_0)d}
 \end{aligned}$$

Рис. 2. Математична модель для розрахунку просторового змінювання потужності експозиційної дози гамма-випромінювання у приміщенні: A, B, H – розміри приміщення; y_0 – висота площі вимірювання в системі координат (x, y, z) ; d – товщина шару половинного ослаблення матеріалу; h – товщина плити; P – потужність дози, створювана одиничним елементом плити в точці, що знаходиться на одиничній відстані R від його центра

Точність результату розрахунку можна підвищувати збільшенням кількості одиничних елементів, зменшуючи при цьому їхні розміри. Поділ плити на одиничні елементи може бути не тільки умовним, але й реальним. Реальними одиничними елементами можна вважати цеглу, блоки і кахельну плитку.

Для розв'язання практичних задач щодо визначення потужності дози необхідно визначити потужність дози у довільній точці P_S , створювану елементарним об'ємом для цього матеріалу, в такий спосіб:

- 1) зробити дослідний зразок плити з певними розмірами ($A \times B \times H$);
- 2) виміряти експериментально потужність дози $P_{\text{вимір}}$ ($P_{\text{вимір}} = P_{0\Sigma}$) у довільній точці на певній відстані R ;
- 3) обчислити величину $P_S \cdot R^2$ як питому для матеріалу цієї плити за формулою

$$P_S \cdot R^2 = \frac{P_{\text{вимір}}}{\sum_{x=1}^A \sum_{y=1}^B \sum_{z=h}^{H+h} \frac{1}{(x^2 + y^2 + z^2) \cdot 2 \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \left(\frac{z-h}{zd}\right)}} \quad (12)$$

Для визначення потужності дози від кількох плит (у приміщенні) необхідно підсумувати потужність дози від кожної плити окремо.

Для практичного визначення радіаційного фону у приміщенні може бути використана математична модель, показана на рис. 2, створена у середовищі комп'ютерної програми Mathcard-14 на основі формули (12) [7].

Від розподілення потужності експозиційної дози залежить стан здоров'я людини та умови роботи обслуговуючого персоналу у кам'яних приміщеннях, раціональне розташування робочих місць, технологічного обладнання та раціоналізація режимів його експлуатації, передусім прецизійного [8].

Розрахунок для тонкої вертикальної стіни, виготовленої з однорідного будівельного матеріалу, дав змогу побудувати схему розповсюдження потужності експозиційної дози випромінювання ($P_{\text{експ.}}$) залежно від відстані (рис. 3, а). Поблизу стіни потужність дози зростає, на схемі цьому відповідає червоний колір. Збільшення товщини стіни призводить до різкішого підйому $P_{\text{експ.}}$ поблизу стіни (рис. 3, б).

У разі випромінювання від підлоги певної товщини, виготовленої з будівельних матеріалів із різним шаром напівослаблення (d), розрахунок показує наявність максимуму $P_{\text{експ.}}$ у центрі плити (рис. 4). Величина максимуму тим більша, чим вище значення d .

Якщо усе приміщення виготовлене з однорідного будівельного матеріалу, то підвищення потужності дози відмічається у його кутах (рис. 5). Підйом $P_{\text{експ.}}$ у кутах буде тим більшим, чим вище приміщення.

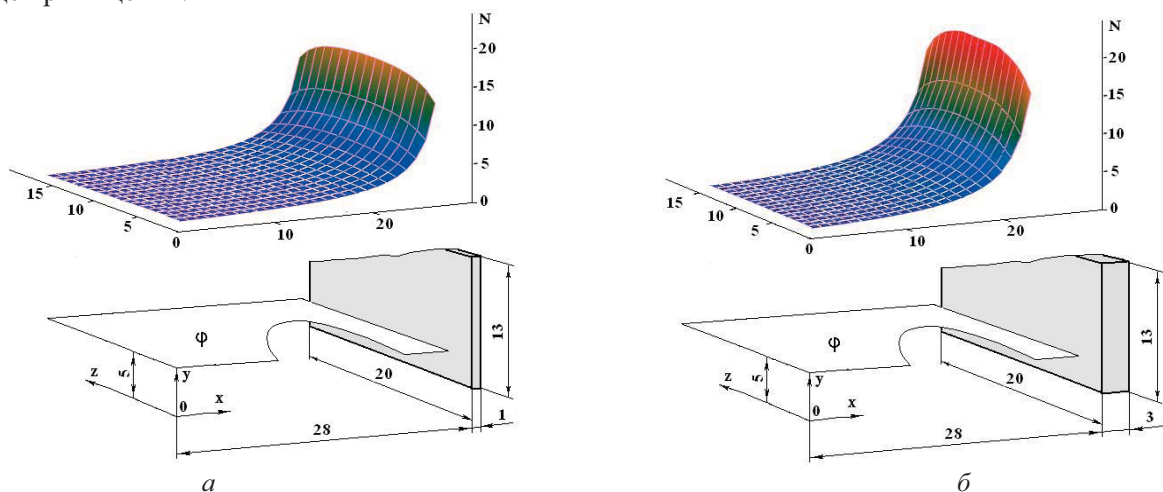


Рис. 3. Розповсюдження потужності експозиційної дози випромінювання від вертикальної стіни з однорідного будівельного матеріалу: а – незначна товщина стіни; б – велика товщина стіни

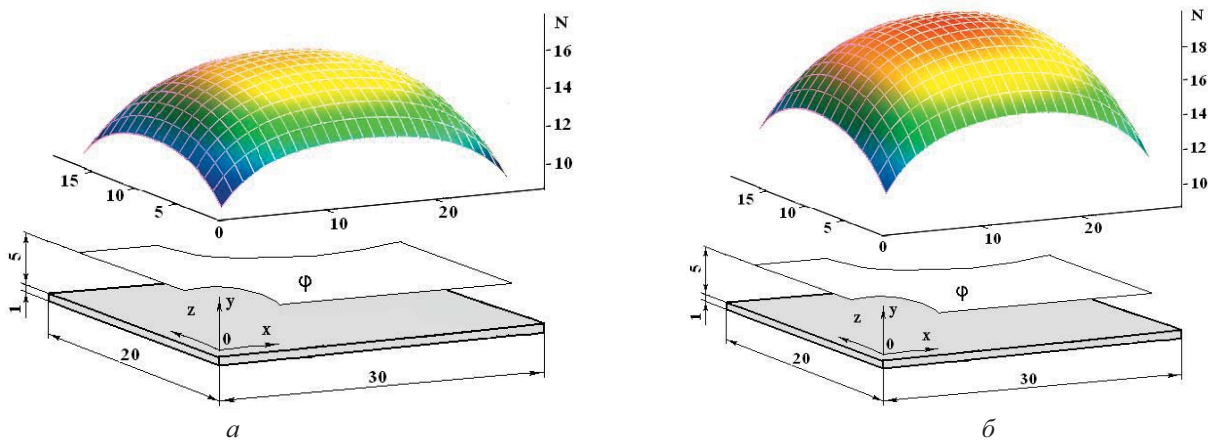


Рис. 4. Радіаційне поле над горизонтальною плитою з однорідного будівельного матеріалу за товщини шару напівослаблення в умовних одиницях: а – $d = 2$; б – $d = 6$

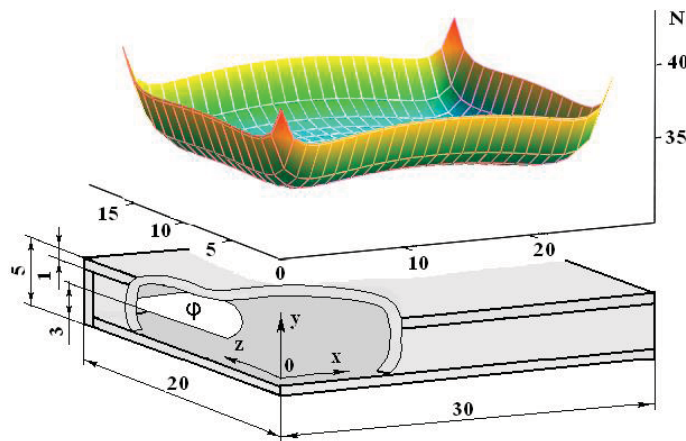


Рис. 5. Радіаційний фон у приміщенні, виготовленому з однорідного будівельного матеріалу

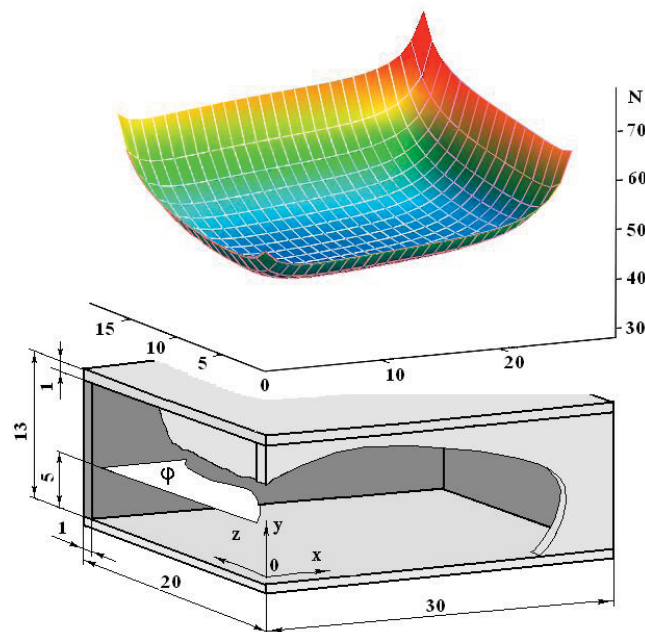


Рис. 6. Радіаційний фон у центрі приміщення, дві стіни якого характеризуються підвищеною радіоактивністю

Значне підвищення $R_{\text{експ.}}$ відмічено у куті приміщення, дві стіни якого виготовлені з будівельного матеріалу з підвищеним вмістом радіонуклідів (рис. 6).

З урахуванням широкого діапазону іонізуючих випромінювань розташування робочих місць персоналу залежить від параметрів і типів випромінювань природних і штучних джерел, відстані від джерела випромінювання до робочого місця, знаходження у певній точці приміщення [8].

В такий спосіб ця математична модель дає змогу встановити значення потужності експозиційної дози в заданих точках одного приміщення, що дає можливість спрогнозувати імовірні дози опромінення людей ще на етапі проектування споруд житлового і промислового призначення, з якого починається технологічне забезпечення радіаційної безпеки об'єктів будівництва.

У цих умовах покращання охорони праці й підвищення безпеки життєдіяльності можливі тільки на основі використання технологічних і організаційних прийомів під час встановлення рівня регулювання для контрольованих параметрів на усіх етапах будівельного виробництва.

1. Крисюк Э.М. Радиационный фон помещений / Э.М. Крисюк. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 120 с.
2. Пиінько О.М. Екологія житла. Радіоактивність житла: навч. посібник / О.М. Пиінько, Л.Ф. Долина, О.М. Пристинська. – Д.: Вид-во Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна, 2007. – 176 с.
3. Ахременко С.А. Управление радиационным качеством строительной продукции: учеб. пособие / С.А. Ахременко. – М.: Изд-во АСВ, 2000. – 236 с.
4. Соколов И.А. Пути уменьшения уровней ионизирующих излучений естественных радионуклидов строительного производства / И.А. Соколов. – Д.: Изд-во Приднепр. гос. ак. стр-ва и архитект., 2004. – 163 с.
5. Шутенко Л.М. Міський житловий фонд: життєвий цикл і радіаційна безпека / Л.М. Шутенко. – К.: Техніка, 2002. – 251 с.
6. Норми радіаційної безпеки України (НРБУ-97). – К.: МОЗ, 1997. – 121 с.
7. Гурский Д. Вычисления в MATHCARD 12 / Д. Гурский, Е. Турбина. – М.: Питер, 2006. – 544 с.
8. Жидецкий В.Ц. Основы охраны труда: учебник / В.Ц. Жидецкий, В.С. Джигирей, А.В. Мельников. – 2-е изд., доп. – Львов: Афиша, 2000. – 351 с.