

УДК 628.518:539.16

Э. Б. ХОБОТОВА, докт. хим. наук, профессор, А. В. ПИВЕНЬ, студентка, М. И. УХАНЁВА, преподаватель  
Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет, г. Харьков

## ИССЛЕДОВАНИЕ РАДИОАКТИВНОСТИ МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ БЕТОНОВ

Гамма-спектрометрическим методом исследованы составляющие многокомпонентных бетонов. Определены удельные активности и эффективные удельные радиоактивности естественных радионуклидов. Установлен класс радиационной опасности строительных материалов. Показано превышение годовой эффективной эквивалентной дозы  $\gamma$ -излучения при использовании исследуемых многокомпонентных бетонов. Оценена величина радоновыделения многокомпонентных бетонов.

**многокомпонентный бетон, гамма-спектрометрический метод, естественный радионуклид, удельная радиоактивность, годовая эффективная эквивалентная доза, радоновыделение**

Естественные источники ионизирующего излучения вносят основной вклад в дозу облучения населения. От всех природных и медицинских источников облучения человек получает в среднем эквивалентную дозу, которая составляет 2,4 мкЗв/год. Среди всех естественных источников ионизирующего излучения ведущее место занимают компоненты радиационного фона помещений. Население промышленно развитых стран мира около 80 % времени проводит в жилых и производственных помещениях. На дозу облучения человека, находящегося в каменном помещении, существенным образом влияют особенности конструкций зданий, а также естественные радионуклиды (ЕРН), которые содержатся в строительных материалах:  $^{223,226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{210}\text{Po}$ ,  $^{210}\text{Pb}$ ,  $^{220,222}\text{Rn}$ ,  $^{40}\text{K}$ . Для производства строительных материалов используют отходы, которые концентрируют ЕРН. Высокая удельная радиоактивность характерна для бетонов с компонентами золы, кварцевых сланцев, а также для шлако- и пемзобетона. Результатом является повышение дозы  $\gamma$ -излучения строительных материалов.

Целью работы являлось исследование радиоактивных свойств многокомпонентных бетонов, производимых в восточных регионах Украины, и расчет дозы облучения населения в помещениях.

Удельная радиоактивность естественных радионуклидов в строительных материалах является параметром, который определяет уровень гамма-фона в помещениях. Для экспериментального определения удельных радиоактивностей радионуклидов был использован гамма-спектрометрический метод с полупроводниковым детектором. Схема включала два Ge-Li коаксиальных детектора и спектрометрическую плату. Измеряемая проба помещалась в сосуд Маринелли; объем пробы – 1 л. В образцах бетона было выявлено наличие естественных радионуклидов  $^{40}\text{K}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$ . Экспериментальные результаты представлены в табл. 1.

**Таблица 1. Результаты гамма-спектрометрических исследований образцов бетонов**

Удельная радиоактивность, Бк/кг (вклад, %)			Сумма удельных активностей, Бк/кг
$^{232}\text{Th}$	$^{226}\text{Ra}$	$^{40}\text{K}$	
59,1 (5,7)	42,3 (4,1)	942 (90,3)	1043,4
54,8 (6,8)	42,4 (5,2)	714 (88,0)	811,2
61,2 (6,0)	46,4 (4,5)	920 (89,5)	1027,6
46,2 (9,8)	24,9 (5,3)	398 (84,9)	469,1
52,8 (62,8)	31,3 (37,2)	–	84,1
35,7 (7,5)	22,2 (4,7)	416 (87,8)	473,9
34,0 (7,5)	38,3 (8,4)	382 (84,1)	454,3



Анализ данных показал, что суммарная удельная радиоактивность образцов бетона колеблется в пределах от 84,1 до 1043,4 Бк·кг<sup>-1</sup>.

Эффективную удельную радиоактивность ЕРН рассчитывали по формуле:

$$C_{эф} = C_{Ra} + 1,31C_{Th} + 0,085C_K \quad (1)$$

Результаты расчета приведены в табл. 2.

**Таблица 2. Эффективная удельная радиоактивность естественных радионуклидов в бетоне**

№ образца	1	2	3	4	5	6	7
$C_{эф}$ , Бк/кг	199,79	174,88	204,77	119,25	100,47	104,33	115,31

Удельная радиоактивность ЕРН в бетонах разных стран (США, Норвегия, Венгрия и Германия) составляет от 211 до 715 Бк·кг<sup>-1</sup> [1, 2]. Сопоставив полученные результаты с литературными данными, можно отметить, что удельная радиоактивность образцов бетона не превышает радиоактивность строительных бетонов других стран. Однако для большинства образцов бетона величина  $C_{эф}$  превышает среднюю по СНГ (93 Бк·кг<sup>-1</sup>) и по Украине (106 Бк·кг<sup>-1</sup>) [2], кроме образцов бетона № № 5, 6.

Все исследуемые образцы бетона относятся к I классу радиационной опасности строительных материалов, которые могут использоваться в строительстве без ограничений. Для них должно выполняться условие [3]:

$$C_{эф} \leq 370 \text{ Бк·кг}^{-1}. \quad (2)$$

Для выяснения относительных радиационных вкладов компонентов бетона в величину  $C_{эф}$  были проведены расчеты удельных радиоактивностей одного из компонентов – цементного клинкера по формуле:

$$C_{ц.ем.} = \frac{C_{эф} - \sum_i \eta_i C_i}{\eta_{ц.ем.}}, \text{ Бк·кг}^{-1}, \quad (3)$$

где  $\eta_i$  – массовый вклад составляющих бетона.

Рассматривали трехкомпонентный бетон с составляющими: щебнем, песком, цементом. Вклад каждой составляющей и их удельные радиоактивности представлены в табл. 3. Анализ данных показывает, что  $C_{ц.ем.}$  для образцов бетона значительно превышает среднюю по СНГ (65 Бк·кг<sup>-1</sup>). Таким образом можно предположить, что одним из факторов повышения удельной радиоактивности многокомпонентных бетонов является высокое значение активности цементной составляющей. Использование таких бетонов может привести к увеличению дозы облучения людей.

Следующим важным фактором повышения дозы гамма-излучения строительных материалов может быть щебневый наполнитель. Повышенная удельная радиоактивность ЕРН в этом щебне обуславливает повышенный уровень гамма-фона в помещениях. В категории домов, построенных из бетона с использованием гранитного щебня как заполнителя бетона, отмечена наиболее высокая мощность дозы. Величину годовой эффективной эквивалентной дозы гамма-излучения для людей, проживающих в современных каменных зданиях, рассчитывали по формуле [2]:

$$D_{пом.} = 4,74C_{эф}, \text{ мкЗв·год}^{-1}. \quad (4)$$

**Таблица 3. Удельные радиоактивности составляющих**

Удельные радиоактивности, Бк/кг (вклад, %)								
щебень	песок	цемент						
		в образце бетона						
		1	2	3	4	5	6	7
141 (65)	97 (10)	393,76 (25)	294,12 (25)	413,68 (25)	71,6 (25)	–	11,92 (25)	55,84 (25)
141 (60)		351,63 (30)	268,6 (30)	368,23 (30)	83,17 (30)	20,57 (30)	33,43 (30)	70,03 (30)
141 (55)		321,54 (35)	250,37 (35)	335,77 (35)	91,43 (35)	37,77 (35)	48,8 (35)	80,17 (35)
141 (50)		298,98 (40)	236,7 (40)	311,43 (40)	97,63 (40)	50,68 (40)	60,33 (40)	87,78 (40)
141 (45)		281,42 (45)	226,07 (45)	292,49 (45)	102,44 (45)	60,71 (45)	69,22 (45)	93,69 (45)
141 (40)		267,38 (50)	217,56 (50)	277,34 (50)	106,3 (50)	68,74 (50)	76,46 (50)	98,42 (50)
141 (35)		255,89 (55)	210,6 (55)	264,95 (55)	109,45 (55)	75,31 (55)	82,33 (55)	102,29 (55)

Величину дозы гамма-излучения естественных радионуклидов бетона определяли по формуле [2]:

$$\Delta D_{\text{ЕРН}} = D_{\text{ГОМ}} - 305, \text{ мкЗв}\cdot\text{год}^{-1}, \quad (5)$$

где 305 мкЗв год<sup>-1</sup> – доза, которую могут получить люди, находящиеся весь год на открытой местности [2].

Таким образом,  $\Delta D_{\text{ЕРН}}$  представляет собой дополнительное действие гамма-излучения ЕРН, обусловленное проживанием людей в каменных зданиях. Результаты расчета представлены в табл. 4.

Наибольшие значения доз получены для первого и третьего образцов бетона, в которых вклад щебня составляет 65–55 %. Во всех случаях превышено среднее значение  $D_{\text{ЕРН}}$  по СНГ 100 мкЗв год<sup>-1</sup> [2]. Гамма-излучение бетонных образцов № № 1, 3 превышает  $D_{\text{ЕРН}}$  соответственно в 6,42 и 6,65 раз и существенно превышает годовую дозу за счет действия гамма-излучения строительных материалов и эманации радона из пор строительного материала (350 мкЗв [2, 3]).

Средняя эквивалентная доза гамма-излучения стройматериалов для развитых стран составляет 350–411 мкЗв/год [4]. В некоторых из рассмотренных примеров дополнительное гамма-излучение естественных радионуклидов превышает эту величину. Например, для образца № 3 оно составляет 665,61 мкЗв/год, а за 50 лет жизни – 0,033 Зв. Суммарное фактическое облучение за 50 лет жизни людей, проживающих в каменных домах, составит:

$$970,61 \cdot 50 : 1000000 = 0,049 \text{ Зв.}$$

Однако эта величина меньше дозы облучения населения за счет ЕРН и при медицинских процедурах, которая за 50 лет жизни составляет 0,1–0,2 Зв. При этом вероятность соматических отдаленных последствий равна 1–2 %; вероятность общей смертности от злокачественных новообразований – 14 % [4]. Это наглядно свиде-

тельствует о том, что при облучении малыми дозами существует реальная опасность проявления последствий, влияющих на здоровье человека.

Многокомпонентный бетон может содержать в себе отходы производства, – такие, как цементная пыль, полученная из вращающихся печей обжига, мельниц помола клинкера, бункера электрофилтра, аппаратов дробления исходных материалов, процессов упаковки и погрузки цемента. Цементная пыль используется в качестве вяжущего компонента. В ее составе обнаружены ЕРН. Экспериментальные данные и расчетные результаты эффективных удельных радиоактивностей приведены в табл. 5.

Исходя из полученных данных, можно сделать вывод, что цементная пыль из бункера электрофилтра имеет значение  $C_{\text{эф}}$ , превышающее радиоактивность цементной составляющей в большинстве образцов многокомпонентных бетонов (табл. 3). Таким образом, данный отход цементного производства не рекомендуется использовать в многокомпонентных бетонах. Это подтверждается расчетом эффективных удельных радиоактивностей многокомпонентных бетонов с использованием цементной пыли из бункера электрофилтра ( $C_{\text{ц}} = 313 \text{ Бк/кг}$ ), щебня ( $C_{\text{щ}} = 141 \text{ Бк/кг}$ ) и песка ( $C_{\text{п}} = 97 \text{ Бк/кг}$ ) при их различном массовом вкладе. Результаты расчета представлены в табл. 6. Из них следует, что увеличение доли цементной пыли в бетоне увеличивает его радиоактивность. Сравнение полученных данных с результатами табл. 2 приводит к выводу, что бетоны с использованием цементной пыли – отходов производства – в 1,12–1,78 раз более радиоактивны, чем при использовании цементного клинкера.

Рассчитаны дозы  $\gamma$ -излучения многокомпонентного бетона с включением цементной пыли и  $\gamma$ -излучения ЕРН, представленные в табл. 7. Как и для многокомпонентных бетонов с включением цементного клинкера,

**Таблица 4. Годовые эффективные эквивалентные дозы гамма- излучения для людей, проживающих в каменных зданиях, и дозы  $\gamma$ -излучения ЕРН бетонов**

Дозы \ № образца	1	2	3	4	5	6	7
Дпом., мкЗв/год	947,00	828,93	970,61	565,25	476,23	494,52	546,57
$\Delta D_{\text{ЕРН}}$ , мкЗв/год	642,00	523,93	665,61	260,25	171,23	189,52	241,57

**Таблица 5. Результаты гамма-спектрометрического исследования цементной пыли из бункера электрофилтра**

Удельные радиоактивности радионуклидов, Бк/кг (вклад, %)						Сумма удельных активностей, Бк кг <sup>-1</sup>	$C_{\text{эф}}$ , Бк кг <sup>-1</sup>
<sup>214</sup> Pb	<sup>214</sup> Bi	<sup>228</sup> Ac	<sup>232</sup> Th	<sup>212</sup> Bi	<sup>40</sup> K		
8,86 (0,2)	60,0 (0,2)	24,0 (0,7)	24,0 (0,7)	142,0 (4,0)	3310,0 (92,7)	3570,0	313,0



для них отмечены повышенные значения  $D_{пом}$  и  $D_{ЕРН}$  при всех соотношениях компонентов.

Оценка величины радоновыделения многокомпонентного бетона (компоненты: цемент, песок, щебень) проводилась по величине  $C_{эф. Ra}$  ( $C_{Ra} \cdot \eta$ ) и максимальной концентрации  $^{222}Rn$  в порах образцов материалов  $C_{Rn max}$ . Не обнаружено превышения  $C_{эф. Ra}$  для I класса радиационной опасности строительных материалов (22,2 Бк кг<sup>-1</sup>) [1, 2].

$C_{Rn max}$  рассчитывают по уравнению [2]:

$$C_{Rn max} = \frac{C_{Ra} \cdot \rho \cdot \eta}{P} \text{ Бк} \cdot \text{л}^{-1}, \quad (6)$$

где  $\rho$  – плотность материала, кг л<sup>-1</sup> (2,4 кг л<sup>-1</sup>);  $\eta$  – коэффициент эманирования (9,5 %);  $P$  – пористость образца (8 %).

Величина  $C_{Rn max}$  определяет значение объемной радиоактивности радона в воздухе помещений. Последняя, в свою очередь, зависит от скорости воздухообмена. Концентрация радона в воздухе помещения  $C_{Rn}$  обычно составляет 0,01  $C_{Rn max}$ , что связано со стек-эффек-

том и присутствием отходов в стройматериалах в виде добавок.

Среднюю годовую тканевую (легочную) дозу облучения человека за счет радона ( $D_{пер.}$ ) для неветилируемого (1) и ветилируемого (2) помещения рассчитывали соответственно по формулам [5]:

$$D_{пер.} = 5 \cdot 10^{14} \cdot C_{Rn} \quad (7)$$

$$D_{пер.} = 1,4 \cdot 10^{11} \cdot C_{Rn} \quad (8)$$

где  $C_{Rn}$ , Ки л<sup>-1</sup>.

При расчете по данным формулам условно принимают, что концентрация радона во вдыхаемом воздухе постоянна; радон находится в равновесном состоянии с продуктами распада. Дозы рассчитывают из приближения, что в легких человека задерживается около 60 % аэрозольных частиц, несущих радиоактивные продукты распада изотопов радона.

**Таблица 6. Расчет эффективной удельной радиоактивности многокомпонентного бетона с использованием цементной пыли из бункера электрофилтра**

Эффективная удельная радиоактивность многокомпонентного бетона, Бк/кг	Вклад составляющих, %		
	цементная пыль	песок	щебень
179,6	25	10	65
188,2	30		60
196,8	35		55
205,4	40		50
214,0	45		45
222,6	50		40
231,2	55		35

**Таблица 7. Годовые эффективные эквивалентные дозы гамма-излучения в зданиях, построенных из бетонов с включением цементной пыли, и дозы  $\gamma$ -излучения ЕРН бетонов**

№ варианта	1	2	3	4	5	6	7
Д <sub>пом.</sub> , мкЗв · год <sup>-1</sup>	851,30	546,3	932,83	973,60	1014,36	1055,12	1095,89
$\Delta D_{ЕРН}$ , мкЗв · год <sup>-1</sup>	546,3	587,07	627,83	668,60	709,36	750,12	790,89

**Таблица 8. Расчет величины годовой тканевой дозы облучения человека для неветилируемого (1) и ветилируемого (2) помещений**

Показатель	$C_{Ra}$ , Бк/кг	$C_{Rn max}$ , Бк/л	$C_{Rn}$ , Бк/л	$C_{Rn}$ , Ки/л	$D_{пер.}$ (1), бэр/год	$D_{пер.}$ (2), бэр/год	$D_{пер.}$ (2), мкЗв/год
Образец 1	42,3	1,16	$1,16 \cdot 10^{-2}$	$3,12 \cdot 10^{-13}$	156	$4,3 \cdot 10^{-2}$	430
2	42,4	1,16	$1,16 \cdot 10^{-2}$	$3,12 \cdot 10^{-13}$	156	$4,3 \cdot 10^{-2}$	430
3	46,4	1,26	$1,26 \cdot 10^{-2}$	$3,43 \cdot 10^{-13}$	171,3	$4,8 \cdot 10^{-2}$	480
4	24,9	0,68	$6,8 \cdot 10^{-3}$	$1,84 \cdot 10^{-13}$	91,9	$2,6 \cdot 10^{-2}$	260
5	31,3	0,85	$8,5 \cdot 10^{-3}$	$2,3 \cdot 10^{-13}$	115,5	$3,2 \cdot 10^{-2}$	320
6	22,2	0,61	$6,1 \cdot 10^{-3}$	$1,65 \cdot 10^{-13}$	82,4	$2,3 \cdot 10^{-2}$	230
7	38,3	1,05	0,0105	$2,83 \cdot 10^{-13}$	141,4	$4 \cdot 10^{-2}$	400

Результаты расчета представлены в табл. 8. Для отдельных образцов бетонов (№ № 1–3, 7) рассчитанная  $D_{\text{пер}}$  (2) превышала среднее значение  $D_{\text{пер}}$  по СНГ ( $350 \text{ мк}^3 \text{ в} \cdot \text{год}^{-1}$ ) [4, 5] для помещений с интенсивным воздухообменом, поэтому исследованные материалы не могут быть рекомендованы в качестве заполнителей для бетонов, используемых для сооружения жилых зданий. Опасность при использовании исследованных бетонов будет связана как с величиной радоновыделения, так и с повышенным  $\gamma$ -излучением ЕРН стройматериалов.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Крисюк Э. М. Нормирование радиоактивности строительных материалов при разном виде их использования /

Гамма-спектрометричним методом досліджені складові багатоконпонентних бетонів. Визначені питомі активності і ефективні питомі радіоактивності природних радіонуклідів. Встановлено клас радіаційної небезпеки будівельних матеріалів. Показано перевищення річної ефективної еквівалентної дози гамма-випромінення при використанні досліджуваних багатоконпонентних бетонів. Оцінена величина радоновиділення багатоконпонентних бетонів.

Э. М. Крисюк, В. И. Карпов, П. Кляус и др. // Report SAAS – 250. Berlin, 1979. – P. 205 – 213.

2. Крисюк Э. М. Радиационный фон помещений / Э. М. Крисюк. – М.: Энергоиздат, 1989 г. – С. 120.
3. Крисюк Э. М. Нормирование радиоактивности строительных материалов // Гигиена и санитария / Э. М. Крисюк – 1980. – № 12. – С. 32 – 34.
4. Ионизирующее излучение: источники и биологические эффекты. Доклад НКДАР ООН за 1992 г. на Генеральной Ассамблее ООН. Т. 1–2. – Нью-Йорк, 1982.
5. Перцов Л. А. Ионизирующие излучения биосферы. М.: Энергоиздат, 1973.

*Поступила в редакцию 12.12.06*

Multicomponent concrete was investigated by gamma-spectrometric method. Specific activities and effective specific activities of natural radioactive nuclides were determined. Radiating danger class of building materials was established. Excess of an annual effective equivalent dose of  $\gamma$ -irradiation is shown when using the investigated multicomponent concrete. The value of radon being released by multicomponent concrete was estimated.