

EXPOSURES FROM RADIATION SOURCES
OF NATURAL ORIGIN

ИССЛЕДОВАНИЕ И НОРМИРОВАНИЕ
РАДИОАКТИВНОСТИ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Э.М.Крисюк, Э.Н.Лисаченко, С.И.Тарасов,
В.П.Шамов, Н.И.Шалак

Институт радиационной гигиены
Министерство здравоохранения РСФСР
Ленинград, СССР

Abstract.

Ionizing radiation in dwellings is one of the main sources of radiation effect on the population. Limitation or decrease of this factor may be done by standardization of radioisotope concentration in building materials. Gamma-spectrometric analyses for Ra-226, Th-232 and K-40 in 300 samples of building materials from various regions of the USSR have been performed and predicted values of gamma radiation doses in buildings made of these materials have been calculated. To evaluate the parameters determining air concentration of Rn in dwellings Rn accumulation and mechanism of its release have been studied. For limitation of external gamma radiation levels in dwellings the following values of specific radioisotope permissible concentration have been suggested: 10, 7, 126 pCi/g for Ra-226, Th-232 and K-40 respectively. For limitation of Rn concentration in dwellings permissible level of effective Ra-226 concentration (the product of Ra-226 concentration by emanation factor) has been recommended 0.6 pCi/g.

Реферат

Ионизирующее излучение в жилых помещениях является одним из основных источников радиационного воздействия на население. Ограничение или уменьшение этого фактора возможно путем нормирования содержания радиоизотопов в строительных материалах.

Проведены гамма-спектрометрические исследования содержания радия-226, тория-232 и калия-40 в 300 образцах стройматериалов из различных районов СССР и рассчитаны ожидаемые дозы гамма-излучения в помещениях, построенных из этих материалов. Для выявления параметров, определяющих содержание радона в воздухе помещений изучен механизм накопления радона и механизм радоновыделения.

Для ограничения внешнего гамма-излучения в помещениях предложены следующие значения допустимого содержания отдельных радиоизотопов: *Ra-226* - 10; *Th-232* - 7; *K-40* - 126 пКи/г. Для ограничения концентрации радона в жилых помещениях рекомендовано допустимое значение эффективной концентрации радия /произведение концентрации радия на коэффициент эманирования/, равное 0,6 пКи/г.

Введение

В настоящее время наибольший вклад в облучение населения в целом дают источники ионизирующей радиации естественного происхождения. Величина дозы облучения населения за счет большинства естественных источников, таких как космическое излучение, излучение земных пород, а также калия и некоторых других радиоактивных изотопов, содержащихся в организме человека, практически не может быть изменена. Особое положение в этом отношении занимает излучение строительных материалов, используемых для сооружения жилых, общественных, промышленных зданий и дорожных покрытий. Величина дозы облучения за счет излучения строительных материалов варьирует в довольно широких пределах в зависимости от содержания в них естественных радиоактивных изотопов.

Резко выраженная урбанизация населения, наблюдающаяся во всех странах, приводит к расширению масштабов жилищного строительства. При этом происходит массовое переселение людей из деревянных в кирпичные или бетонные дома, уровни излучения в которых, как правило, выше, чем в деревянных. Кроме того, развитие массового жилищного строительства приводит к необходимости изыскания новых, более дешевых материалов. В качестве таковых все чаще используются отходы горнорудной, металлургической и химической промышленности. Эти отходы могут содержать радиоактивные вещества в больших количествах, чем традиционно используемые строительные материалы². В связи с этим возникает необходимость в ограничении использования таких материалов из-за возможности существенного повышения уровня облучения населения.

Ограничение или уменьшение уровня облучения населения за счет излучения строительных материалов возможно путем нормирования их радиоактивности, то есть путем отказа от использования материалов с высоким содержанием радиоактивных веществ. Для обоснования таких нормативов необходимо достаточно подробно изучить существующие уровни радиационного воздействия на население излучения строительных материалов, их зависимость от вида используемых материалов и т.д.

Гамма-излучение в жилых помещениях

В различных странах /Швеция, Англии, СССР, США, Австрии, Японии, Болгарии, ФРГ, ГДР/ проведены многочисленные измерения дозы гамма-излучения в помещениях. Значения гамма-фона в помещениях из различных строительных материалов и на открытой местности согласно этим измерениям представлены в таблице I^{1, 3-6}.

Таблица I

Дозы гамма-излучения внутри и вне помещений
за вычетом космического фона /мрад/год/

Тип строительного материала	Внутри помещения			Вне помещения			Разность средних доз
	мин.	макс.	сред.	мин.	макс.	сред.	
Дерево	29	100	56	23	119	56	0
Кирпич	26	346	87	21	308	78	9
Бетон	48	202	115	23	120	70	45
Гранит	75	300	125	18	118	74	51

Из таблицы видно, что доза гамма-излучения в помещениях выше дозы на открытой местности /за исключением деревянных домов/.

Стены и перекрытия помещений являются источниками излучения и экранами от космического излучения и излучения земных пород. Экранирование космических лучей перекрытиями зданий невелико. После прохождения 1, 2 и 3 перекрытий космическое излучение ослабляется на 13, 18 и 21 процент соответственно. Степень экранирования излучения земных пород зависит от толщины стен помещения. Для излучения естественных радиоактивных изотопов толщина слоя насыщения составляет 100 г/см^2 , при этом слой 50 г/см^2 обеспечивает 80% насыщения. При толщинах стен и перекрытий, близких к слою насыщения и характерных для современного жилищного строительства, излучение земных пород полностью экранируется. В этом случае мощность дозы в помещении определяется концентрацией радиоактивных веществ в используемых строительных материалах. Для определения коэффициентов пропорциональности между этими величинами можно воспользоваться значениями, рассчитанными для полости в бесконечном пространстве. Эти значения вычислялись рядом авторов. И хотя ими применялись различные методы расчета, полученные коэффициенты оказались весьма близкими. Используя коэффициенты, приведенные в работе для максимально возможной мощности дозы в помещении, построено целиком из данного материала /за вычетом космического фона/ получаем:

$$R_{\text{мкр/час}} = 4,7 C_{Ra} + 6,7 C_{Th} + 0,37 C_K \quad /1/$$

где C_{Ra} , C_{Th} и C_K — удельные активности радия-226, тория-232 и калия-40 в строительном материале в пКи/г при наличии радиоактивного равновесия в рядах урана и тория.

В реальных помещениях мощность дозы может оказаться несколько меньше значения, полученного по формуле /1/ как за счет наличия окон и дверей, так и в ряде случаев недостаточной толщины стен и перекрытий. Кроме того, для сооружения стен и перекрытий могут использоваться разные строительные материалы. В этих случаях мощность дозы в помещении будет иметь промежуточные значения между результатами расчета для отдельных материалов.

Для определения диапазона изменений концентраций радиоактивных веществ в строительных материалах нами, с помощью низкофонового гамма-спектрометра, было исследовано около 300 образцов различных строительных материалов из разных районов СССР. Результаты измерений представлены в таблице II. В ней также приведены величины мощности дозы в помещении, рассчитанные по формуле /1/. Величина годовой дозы, обусловленная излучением строительных материалов в предположении 18-часового пребывания людей в помещении и с учетом коэффициента экранирования годоад, равного 0,63, может быть вычислена по формуле:

$$D_{\text{мрад/год}} = 18,5 C_{Ra} + 26,7 C_{Th} + 1,47 C_K \quad /2/$$

При обосновании нормативов радиоактивности строительных материалов мы исходили из того, что за счет проживания в домах, построенных из материалов с повышенным содержанием радиоактивных изотопов допустимо дополнительное облучение годоад, равное 100 мрад/год, по сравнению с облучением в домах со средним содержанием радиоактивных веществ. 100 мрад/год это средняя доза облучения годоад за счет излучений естественных источников. Поэтому такое нормирование ограничивает годовую дозу людей, проживающих в домах, построенных из строительных материалов с повышенным содержанием радиоактивных веществ, величиной удвоенного естественного фона. Годовая доза в домах из обычных материалов может быть подсчитана по формуле /2/ для концентрации радиоактивных изотопов, равной кларковой $C_{Ra} = 0,9$; $C_{Th} = 1,41$; $C_K = 21,5 \text{ пКи/г}$. Она со-

Таблица II

Содержание естественных радиоизотопов в строительных материалах
/пКи/г/ и мощность дозы в помещении /мкр/час/

Тип материала	Число проб	Торий-232		Радий-226		Калий-40		Мощность дозы в помещении		Суммарное содержание изотопов /в долях ЦДК/						
		мин.	мак.	ср.	мин.	мак.	ср.	мин.	мак.	ср.	мин.	мак.	ср.			
Красный кирпич	55	0,66	1,5	1,0	1,1	1,6	1,5	11	25	20	13	25	20	0,27	0,55	0,42
Бетон тяжелый	87	0,4	3,7	0,8	0,6	2,9	0,9	7	24	15	8	45	14	0,16	0,95	0,31
Бетон легкий	16	0,6	2,1	0,9	1,4	3,3	2,0	5	26	14	12	37	19	0,26	0,8	0,41
Гранит	2	-	-	4,5	-	-	3	-	-	40	-	-	56	-	-	1,20
Т у ф	13	1,1	2,9	2,0	2,1	2,6	2,6	26	34	18	24	41	30	0,52	0,88	0,69
Песок природный	18	0,4	0,8	0,5	0,4	1,0	0,5	2	17	8	4	15	8	0,09	0,33	0,17
Песок хвостовой	14	-	-	0,5	-	-	0,8	-	-	6	-	-	8	-	-	0,19
Цемент	7	0,4	0,5	0,4	0,4	3,2	1,2	3	11	6	5	22	10	0,12	0,46	0,22
Шлаки доменные	29	0,3	1,2	0,6	1,0	3,4	1,8	0,9	13	13	7	28	16	0,14	0,59	0,34
Шлаки фосфорные	15	-	-	0,6	-	-	0,6	-	-	4	-	-	33	-	-	0,72
Щебень	8	0,4	5,0	2,1	0,4	0,4	0,4	6	8	7	6	38	18	0,14	0,81	0,38
Облицовочные материалы	35	0,4	4,7	2,3	0,4	3,4	1,9	22	47	39	11	61	36	0,24	1,3	0,76

ставляет 36 мрад/год. Увеличение годовой дозы за счет проживания в домах, построенных из материалов с повышенным содержанием радиоактивных веществ, определяется по формуле:

$D \text{ /мрад/год/} = 18,5 C_{Ra} + 26,7 C_{Th} + 1,47 C_k - 86 \text{ /З/}$
 ПДК радиоактивных изотопов в строительных материалах могут быть рассчитаны по формуле /З/ при условии, что доза дополнительного облучения не должна превышать 100 мрад/год. Они составляют:
 $C_{Ra} = 10$; $C_{Th} = 7,0$; $C_k = 126 \text{ пКи/г.}$ При наличии в строительном материале этих изотопов должно выполняться условие:

$$\frac{C_{Ra}}{10} + \frac{C_{Th}}{7,0} + \frac{C_k}{126} \leq 1 \quad /4/$$

В таблице II приведены суммарные концентрации радиоактивных веществ в исследованных материалах /в долях ПДК/. Из таблицы видно, что превышение допустимой концентрации обнаружено только у гранита и некоторых отделочных материалов.

Таким образом, предлагаемые величины допустимого содержания радиоактивных веществ не приведут к ограничению применения подавляющего большинства традиционных строительных материалов. Ограничения распространяются на относительно небольшое число материалов с повышенным содержанием радиоактивных веществ. Такие материалы могут применяться при их разбавлении слабо радиоактивными компонентами, а также для сооружения дорог, плотин, времяпребывание людей вблизи которых ограничено.

Радон в воздухе жилых помещений

Наличие радиоактивных веществ в строительных материалах, помимо дополнительного внешнего облучения приводит к повышению радиоактивности воздуха в помещении по сравнению с атмосферным. Параметрами, определяющими степень радиационного воздействия радиоактивности воздуха, являются концентрации радона, торона и их продуктов распада. В литературе неоднократно отмечались случаи довольно высоких концентраций радона в помещениях, особенно в домах из материалов, изготовленных из отходов горно-рудной промышленности /вплоть до 15 пКи/л/. Наличие таких случаев свидетельствует о необходимости контроля за радиоактивностью воздуха в помещениях. Однако концентрация эманаций и их короткоживущих продуктов распада неудобны в качестве параметров для контроля, поскольку они связаны со степенью воздухообмена, которая варьирует в довольно широких пределах в зависимости от метеоусловий, длительности проветривания помещений и т.д.

Для выявления более удобного для контроля параметра достаточно точно характеризующего радиоактивность воздуха в помещении, нами был рассмотрен механизм накопления радона в помещении. Решение соответствующего дифференциального уравнения дает выражение для изменения во времени концентрации радона в воздухе помещения:

$$C = \frac{QS + V k C_{атм}}{\lambda + k} [1 - e^{-(\lambda + k)t}] + C_0 e^{-(\lambda + k)t} \quad /5/$$

где: C_0 — концентрация радона в момент $t = 0$ /Ки/м³/
 Q — удельное радоновыделение ограждений /Ки/м²сек/
 S — площадь ограждений помещения /м²/
 V — объем помещения /м³/
 λ — постоянная распада радона $2,1 \cdot 10^{-6} \text{ сек}^{-1}$ /сек⁻¹/
 k — кратность воздухообмена в помещении /сек⁻¹/
 * х/ предельно допустимые концентрации

Сатм — концентрация радона в атмосферном воздухе /Ки/м³/

Из формулы /5/ следует, что установление равновесной концентрации радона в помещении определяется величиной $\lambda + K$. При кратности воздухообмена, равной одному обмену в час / $K = 2,8 \cdot 10^{-7}$ сек⁻¹/, равновесная концентрация достигается уже через несколько часов. Выражение для равновесной концентрации радона с учетом того, что $\lambda \ll K$, записывается в виде:

$$\text{Сравн.} = \frac{Q}{K} \frac{S}{V} + \text{Сатм} \quad /6/$$

Из формулы видно, что концентрация радона в помещении всегда выше концентрации в наружном воздухе. Разность этих концентраций пропорциональна удельному радоновыделению ограждений помещения, отношению S/V и обратно пропорциональна кратности воздухообмена. Отношение S/V для обычных помещений не сильно варьирует. Его значение для типичных жилищ даны в таблице III, из которой следует, что среднее значение этого отношения составляет величину 1,5.

Таблица III

Отношение площади ограждений к объему помещения / S/V /

высота М	S / M^2	15 = 4 x 3,75	20 = 5 x 4	30 = 5x6	40=6x6,7
2,5		1,83	1,70	1,53	1,43
3,0		1,70	1,57	1,40	1,30
3,5		1,60	1,47	1,30	1,20

Формула /6/ позволяет оценить поступление радона из почвы под зданием. В работе приводятся величины удельного радоновыделения почв: среднее значение $4,5 \cdot 10^{-15}$, диапазон изменений от $2 \cdot 10^{-15}$ до $1,7 \cdot 10^{-12}$ Ки/сек.м². Расчетное значение концентрации радона в помещении размером 5 x 4 и высотой 3 м, в предположении, что почвенный радон полностью поступает в помещение, а радоновыделение ограждений отсутствует и концентрация эманации в атмосферном воздухе равна 0,1 пКи/л, приведено в таблице IV.

Таблица IV

Расчетные значения концентрации радона в помещении / пКи/л/ при поступлении радона из почвы

Q / Ки/м ² сек/	$1,7 \cdot 10^{-12}$	$4,5 \cdot 10^{-13}$	$2 \cdot 10^{-15}$
K / час ⁻¹			
0,1	20,5	5,5	0,12
1	2,1	0,64	0,10
10	0,3	0,15	0,10

Из таблицы видно, что в помещениях с плохой изоляцией пола поступление радона из почвы может играть существенную роль. В современном многоэтажном строительстве используются бетонные перекрытия, которые практически полностью предотвращают поступление в жилые помещения почвенного радона. В таких домах основным источ-

ником радона является радоновыделение стен и перекрытий. Удельное радоновыделение ограждений является более удобным параметром, поскольку его величина, в отличие от концентрации радона, практически не зависит от воздухообмена в помещении. Это было установлено в результате рассмотрения механизма радоновыделения. Процесс радоновыделения можно разделить на два этапа: эманирование радона во внутренние поры материала /доля атомов радона, выходящих во внутренние поры, называется коэффициентом эманирования/ и диффузию радона по этим порам с выходом из материала. Такое разделение оправдано тем, что внутри зерен минерала диффузия протекает крайне медленно /коэффициент диффузии имеет порядок 10^{-22} см²/сек [7]. Поэтому распространяются по материалу только те атомы радона, которые вышли за счет отдачи при альфа-распаде радия во внутренние поры материала. Процесс распространения радона по порам материала описывается уравнением диффузии. При рассмотрении радоновыделения стен можно считать, что диффузный перенос радона осуществляется в направлении, перпендикулярном к поверхности стен /по координате x /. Потоки радона, параллельные поверхности стены, взаимно уравновешивают друг друга, так как высота и ширина стены значительно больше ее толщины. В этом случае уравнение диффузии может быть записано в виде:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \lambda C_0 - \lambda C + \frac{b}{\delta} \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad /7/$$

где

$$C_0 = \frac{C_{\text{ра}} \rho b}{\delta} \quad /8/$$

- C_0 - максимально возможная концентрация радона /Ки/см³/,
 $C_{\text{ра}}$ - концентрация радия в материале /Ки/г/,
 ρ - плотность материала /г/см³/,
 b - коэффициент эманирования /отн.ед./,
 δ - пористость материала /отн.ед./,
 δ - коэффициент диффузии /см²/сек/

За начало координат принята половина глубины стены. В силу симметрии задачи поток радона при $x=0$ равен 0. Отсюда следует первое граничное условие

$$b \frac{\partial C}{\partial x} \Big|_{x=0} = 0 \quad /9/$$

Второе граничное условие можно сформулировать, исходя из баланса активности вне стены. Будем считать, что диффузия радона из стены толщиной $2d$ происходит в ограниченный внешний объем глубиной l . Для простоты можно принять, что на выходе из стены происходит мгновенное выравнивание концентрации радона. При этом второе граничное условие может быть записано в виде:

$$-b \frac{\partial C}{\partial x} \Big|_{x=d} - l \lambda C \Big|_{x=d} = l \frac{\partial C}{\partial t} \Big|_{x=d} /10/$$

Решение уравнения /7/ с граничными условиями /9/ и /10/ для стационарного случая / $\partial C / \partial t = 0$ / имеет вид:

$$C_x = C_0 \left[1 - \frac{\text{ch}(\frac{x}{l_0})}{\text{ch} \beta + \frac{l}{2\delta} \text{sh} \beta} \right] \quad /11/$$

где

- $l_0 = \sqrt{\frac{b}{\lambda \delta}}$ - длина диффузии,
 $L = l / d \delta$ - отношение внешнего к внутреннему объему воздуха
 $\beta = d / l_0$ - отношение половины толщины стены к длине диффузии.

Концентрация радона во внешнем воздухе $/C|_{x=d}$ выражается

$$C|_{x=d} = C_0 \left[\frac{1}{1 + \frac{1}{\beta} \frac{th\beta}{\beta}} \right] \quad /12/$$

Удельное радоновыделение равняется:

$$Q = \beta \frac{\partial C}{\partial x} \Big|_{x=d} = Q_0 \frac{th\beta}{\beta} \left[\frac{1}{1 + \frac{1}{\beta} \frac{th\beta}{\beta}} \right] \quad /13/$$

где Q_0 — максимально возможное радоновыделение, то есть радоновыделение в случае, когда весь радон, попавший во внутренние поры, выходит наружу.

Оно равно:

$$Q_0 = C_{Ra} \beta \lambda d \rho \quad /14/$$

Для жилых помещений были рассмотрены два случая:

1. Отношение объема к объему внутрисконного воздуха $|d|$ велико. В этом случае

$$\frac{C(d)}{C_0} \Big|_{d \rightarrow \infty} \rightarrow 0; \quad Q \Big|_{d \rightarrow \infty} \rightarrow Q_0 \frac{th\beta}{\beta} \quad /15/$$

Это приближение справедливо для диффузии радона в сильно вентилируемое помещение, поскольку при этом эффективный внешний объем значительно превосходит объем помещения.

2. Для неветилируемого помещения внешний объем равен объему помещения и величина $|d|$ в этом случае равна:

При $S/V = 1,5 \text{ м}^{-1}$, $d = 0,25 \text{ м}$, $\delta = 0,4$; величина $d = 6,7 \frac{th\beta}{\beta}$ всегда меньше 1. Принимая $\frac{th\beta}{\beta} = 1$, получим: $Q = 0,87 Q_0$, $C|_{x=d} = 0,13 C_0$. Если $\frac{th\beta}{\beta} < 1$, то Q будет еще меньше отличаться от Q_0 . $\alpha = V/Sd\delta \quad /16/$

Таким образом, для помещений обычных размеров величина удельного радоновыделения практически не зависит от кратности воздухообмена, то есть этот параметр является удобным для контроля. Однако измерение радоновыделения возможно проводить либо в уже построенных помещениях, либо на макетах ограждений. Это создает определенные трудности при радиационно-гигиенической оценке новых строительных материалов. В последнем случае желательно уметь определять его величину путем исследования небольших образцов материала.

Из выражений /14/ и /15/ следует, что удельное радоновыделение пропорционально произведению концентрации радия в строительном материале на коэффициент эманирования, которое назовем эффективной концентрацией радия:

$$C_{Ra \text{ эфф}} = C_{Ra} \beta \quad /17/$$

Кроме того величина радоновыделения зависит от β — отношения половины толщины стены к длине диффузии. Функция $\frac{th\beta}{\beta}$ при $\beta \leq 1$ не сильно отличается от единицы, а при $\beta \geq 2$ имеет вид $\sim 1/\beta$. Таким образом, если длина диффузии радона в материале ограждения больше половины толщины ограждения, то радоновыделение можно оценивать по его максимальной величине Q_0 . Следует отметить, что мы рассматривали чисто диффузное приближение. Наличие же подпора ветра, перепад температур между комнатным и наружным воздухом, могут привести к появлению конвекционных потоков, т.е. к уменьшению эффективного значения β . При этом радоновыделение будет возрастать, но в любом случае оно не может превысить величину Q_0 . Следовательно, в реальных условиях возможны измене-

ния удельного радоновыделения в пределах от $Q_0 \text{ th } \beta/\beta$ до Q_0 . Если β невелико, то эти изменения будут незначительны. Результаты экспериментального определения длины диффузии радона в строительных материалах и характерные для этих материалов величины β приведены в таблице У.

Таблица У

Длина диффузии радона в строительных материалах

Вид материала	Длина диффузии l_0 /см/	Характерная толщина ограждений $2d$ /см/	$\beta = \frac{d}{l_0}$
Бетон тяжелый	15; 10; 13;	10	0,4
Бетон легкий	29; 28; 22	12 ÷ 35	0,2 - 0,7
Красный кирпич	15	50	1,7

Принимая во внимание данные таблицы У можно заключить, что для большинства ограждений радоновыделение будет определяться максимально возможной величиной, которая является функцией только эффективной концентрации радия в стройматериале. Эффективная концентрация радия является параметром, удобным для контроля за радиоактивностью воздуха в помещении, поскольку ее возможно определять путем исследования небольших образцов материала.

Эманиационным методом /при измельчении до нескольких мм/ нами измерена эффективная концентрация радия в нескольких десятках образцов различных строительных материалов и рассчитаны равновесные концентрации радона в помещениях из данных материалов. Расчет концентрации радона проводился для постоянного воздухообмена, равного 1/час, $S/V = 1,5$. Толщина ограждений и плотность для тяжелого и легкого бетонов принимались соответственно равными $2d = 10$ и 20 см; $\rho = 2,1$ и $1,6$ г/см³. Для всех остальных материалов принималось $2d = 50$ см; $\rho = 1,5$ г/см³. Радоновыделение считалось максимально возможным, концентрация радона в атмосферном воздухе не учитывалась. В таблице УІ представлены также значения коэффициентов эманирования, рассчитанные с привлечением результатов гамма-спектрометрического определения концентрации радия в данных образцах.

Таблица УІ

Эффективная концентрация радия в строительных материалах и расчетное значение концентрации радона в помещениях

Тип материала	Эффект. концентрация радия $C_{Ra \text{ эфф}} \times 10^{-2}$ /пКв/г/			Коэффициент эманирования ϵ /%/			Концентрация радона в помещении C_{Rn} /пКв/г/		
	мин.	макс.	ср.	мин.	макс.	ср.	мин.	макс.	ср.
Бетон тяжелый	0,8	12	4,1	0,4	10,0	3,3	0,02	0,29	0,10
Бетон легкий	2,0	13,2	5,4	0,4	10,0	2,1	0,7	0,4	0,2
Красный кирпич	0,8	5,1	2,1	0,4	5,7	1,7	0,03	0,22	0,09
Кирпич силикатный	2,4	6,2	3,8	4,5	8,0	6,7	0,10	0,27	0,16
Туф	3,5	10,2	6,5	1,8	6,0	3,6	0,15	0,43	0,28
Кирпич пумицитовый	—	—	6,1	—	—	5,8	—	—	0,26
Пумицит	—	—	28,0	—	—	9,0	—	—	1,2

Допустимую величину эффективной концентрации радия можно установить, исходя из условия, чтобы при постоянном воздухообмене, равном 1 час^{-1} , не было превышения СДК^х короткоживущих продуктов распада радона $/C_T/$ для населения $/1 \cdot 10^{-3} \text{ Ки/м}^3 \cdot \text{г} \cdot \text{с}^{-1}/$. Принимая, что радоновыделение ограждений определяется максимально возможной величиной $/\text{время пребывания в помещении } 18 \text{ часов в сутки}/$ и пренебрегая величиной $C_{\text{атм}}$, выражение для $C_{\text{Ra эфф}}$ можно записать в виде:

$$C_{\text{Ra эфф}} / \text{Ки/г} / = 10^{-6} \frac{C_{\text{Ra}} \cdot K}{0.75 \alpha \rho \lambda \cdot S/v} \quad /18/$$

При воздухообмене 1 час^{-1} концентрация короткоживущих продуктов распада в помещении составляет $0,53 C_{\text{Ra}}$. С учетом этого:

$$C_{\text{Ra эфф}} / \text{Ки/г} / = 10^{-6} \frac{C_i \cdot K}{0.4 \alpha \rho \lambda \cdot S/v} \quad /19/$$

Значение допустимой величины $C_{\text{Ra эфф}}$ можно получить из формулы /19/ принимая $\alpha = 0,25 \text{ м}$; $\rho = 1,5 \text{ т/м}^3$; $S/v = 1,5 \text{ м}^{-1}$

$$C_{\text{Ra эфф}} = 0.6 / \text{п Ки/г} / \quad /20/$$

Как видно из таблицы VI среди исследованных материалов не оказалось ни одного, имеющего эффективную концентрацию радия, близкую к допустимой величине. Сопоставление предлагаемых нормативов концентрации радия, определяющей внешнее облучение людей, и эффективной концентрации радия, определяющей радиоактивность воздуха в помещении, показывает, что первый норматив является, как правило, более жестким. Нормирование по эффективной концентрации радия может быть лимитирующим фактором только для материалов, радиоактивность которого обусловлена, в основном, радием и обладающих повышенным эманированием $/p > 6\%/$. Наблюдающиеся рядом авторов концентрации радона в помещении, превышающие 1 пКи/л , во многих случаях могут быть связаны с тем, что измерения производились при пониженном воздухообмене. Кратность воздухообмена, как правило, при этом не измерялась. Величина же допустимой эффективной концентрации радия рекомендована, исходя из среднегодовой величины кратности воздухообмена, и по этой причине ограничивает только среднегодовую концентрацию радона в помещении.

Исходя из меньшей значимости радиоактивности воздуха по сравнению с внешним облучением, контроль за эффективной концентрацией радия целесообразно проводить только для материалов с повышенным содержанием радия $/\text{более } 5 \text{ пКи/г}/$. Следует иметь в виду, что материалы с эффективной концентрацией радия, превышающей допустимую, можно применять при условии использования противорадоновых покрытий. Наши исследования показали, что двухкратное покрытие стен масляной краской снижает радоновыделение на порядок. Кроме того концентрацию радона в помещении можно уменьшить путем увеличения воздухообмена.

С целью проверки результатов теоретического рассмотрения механизмов накопления в помещении и радоновыделения, точности методов измерения параметров, характеризующих эти процессы, а также соотношения между дозой внешнего гамма-излучения в помещении и концентрацией радиоизотопов в стройматериалах нами проведены исследования в модельном помещении. Помещение было построено из материалов, содержание радиоактивных веществ в которых, коэффициенты эманирования и другие параметры были предварительно исследованы. В помещении

х/ средняя допустимая концентрация

был обеспечен регулируемый воздухообмен. Рассчитанные и измеренные значения удельного радоновыделения различных ограждений представлены в таблице УП.

Таблица УП

Радоновыделение ограждений экспериментального помещения

Тип ограждения	Удельное радоновыделение /Ки/м ² сек/ 10 ¹⁴ .	
	Расчетные значения	Измеренное значение
Внешняя стена	1,8	2,0 ± 0,1
Внутренняя стена	1,1	1,14 ± 0,06
Пол	0,7	1,20 ± 0,07
Потолок	0,9	0,80 ± 0,08

Из таблицы видно, что наблюдается хорошее согласие расчетных и экспериментальных значений удельного радоновыделения для всех ограждений, кроме пола, для которого измеренное значение в 1,5 раза выше расчетного. Это расхождение обусловлено частичным проникновением радона из подвального помещения.

Расчетные и измеренные значения концентрации короткоживущих продуктов распада радона при различных кратностях воздухообмена в экспериментальном помещении даны в таблице УШ, из которой видно хорошее согласие между этими величинами.

Таблица УШ

Концентрация продуктов распада радона
в модельном помещении /пКи/л/

Воздухообмен К /час ⁻¹ /	К о н ц е н т р а ц и я	
	Расчетная	Измеренная
I	0,08	0,10
I,8	0,021	0,017

Расчет максимально возможной мощности дозы в модельном помещении дал величину 19,8 мкр/час. Для сопоставления этого значения с измеренной дозой необходимо внести 2 поправки: на наличие окон и дверей и на отсутствие слоя насыщения по гамма-излучению /толщина ограждений составляла 20 г/см /. Величины поправок составляют 0,87 и 0,65, соответственно. С учетом их расчетная мощность дозы гамма-излучения в помещении составила 11 мкр/час. Измеренная величина равна 10 мкр/час. Таким образом, наблюдается вполне удовлетворительное согласие.

Заключение

Нормативы радиоактивности строительных материалов, разработанные на основе проведенных исследований, предназначены для ограничения радиационного воздействия на население за счет этого фактора. Предложенные нормативы не ограничивают использование в жилищном строительстве основной массы традиционных материалов. Строительные материалы, содержание радиоактивных изотопов в которых превышает нормативные величины для жилищного строительства, могут использо-

ваться для других целей. Способ ограничения радиационного воздействия на население при таком использовании указанных материалов требуют дальнейших исследований.

Широкое внедрение нормативов радиоактивности строительных материалов требует разработки оперативных и экспертных методов контроля. В качестве оперативного метода контроля целесообразно использовать измерение мощности дозы в массивах стройматериалов /карьеры, склады, отвалы и пр./ Из сопоставления формул /2/ и /4/ следует, что предложенные нормативы соответствуют мощности дозы в 4-н геометрии 47 мкр/час. Для экспертного контроля перспективно использование высокочувствительных гамма-спектрометров, а при обнаружении содержания радия-226 более 5 пКи/г — измерение эманирования образцов

Литература

1. КУЛЬТКВИСТ Б. Ионизирующее излучение естественных источников. ИИ, Москва, 1959
2. BERGSTROM STIG OW, WAHLBERG THOR. Radiumhaltiga byggnadsmaterial utstralskyddssynpunkt. Aktiebolaget Atomenergi, Stockholm, AES-7(67)
3. POWDER W.M., CONDON W.J. Measurement of the exposure of human population to environmental radiation. Nature(London) 206, 658, (65)
4. MAYNEORD W.V., HILL C.R. Natural and man-made background radiation. Radiation Dosimetry, 3, 401-451, Academic Press, New York (69)
5. OHLSEN H. Determination of population burden by natural external radiation on the territory of GDR. Kernenergie, 13, 3, 91-96 (70)
6. SPIERS F.W., MCHUGH M.J., APLEBY D.B. Environmental gamma-ray dose to populations; surveys made with a portable meter. Natural Radiation Environment, pp 885-905, The Univ. of Chicago Press 1964
7. CLAY F.A., van GEMERT, WIERSMA. Decrease of primaries showers and ionisation of cosmic ray under layers of lead and iron. Physica, 3, 627 - 640, 1936.
8. ШАЛАЕВ И.Л. К вопросу об измерении уровня естественного гамма-фона. Тезисы доклада 4 научно-практической конф. по радиационной гигиене. Л., 1965, 71-79
- 9 Report of the UN Scientific Committee of the effects of atomic radiation, General Assembly Official Records: 17-Session supplement No. 16, (A/5216), New York, 1962
10. ВИНОГРАДОВ А.Г. Геохимия редких и рассеянных химических элементов в почве. АН СССР, 1957
11. GALAMBOS S. Die natuerliche Radioaktivitat der Baustoffe und der Wohnbauten. Wissenschaftliche Zeitschrift der Hochschule fur Bauwesen, Leipzig, Heft 12, 91-94, 1966.
12. ROKA O., VAJDA Z., FREDMERSSKY T. Radon concentration in the air of buildings. Proceedings of the II Symposium on Health Physics Pecs, Hungary, vol. II, pp. 81-83, 1966.
13. БЫКОВСКИЙ А.В. Гигиенические вопросы при подземной разработке урановых руд. М. Медгиз, 1963
14. GILLETIX B.J., KULP J.L. Radon leakage from radioactive minerals. Amer. Mineral., 40, 481-496, 1955.
15. Нормы радиационной безопасности /НРБ-69/. Атомиздат, 1970