

К обоснованию нормативов по содержанию природных радионуклидов в облицовочных изделиях и материалах

И.П. Стамаг¹, Д.И. Стамаг²

¹ ФГУН «Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева» Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, Санкт-Петербург

² Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург

В статье рассматриваются вопросы, связанные с совершенствованием нормативно-правового обеспечения радиационной безопасности населения при воздействии природных источников излучения. В ней приведены расчеты по обоснованию норматива на содержание природных радионуклидов в широком классе современных строительных материалов – облицовочных изделиях. В основу расчетов положено, что применение этих изделий может привести к дополнительной дозе природного облучения населения не более 0,1 мЗв/год. Исходя из этого, показано, что эффективная удельная активность природных радионуклидов в этих изделиях не должна превышать 740 Бк/кг.

Ключевые слова: природные источники излучения, природные радионуклиды, изотопы радона, облицовочные изделия и материалы, мощность дозы гамма-излучения, эффективная доза облучения природными источниками излучения.

Для внутренней отделки стен и полов жилых, общественных и производственных зданий и сооружений широко используются различные виды облицовочных изделий и материалов: глазурованная керамическая и керамогранитная плитки, изделия из природного и искусственного камня и др. Основное их отличие от традиционных строительных материалов состоит в том, что они имеют небольшую толщину, редко превышающую 1 см, и покрывают обычно полы и значительную часть поверхности стен.

В технологии производства большинства этих изделий и материалов, кроме изделий из природного камня, применяются отдельные минеральные компоненты, в которых эффективная удельная активность природных радионуклидов ($A_{эфф}$) существенно превышает установленные нормативы для строительных материалов, используемых при возведении жилых, общественных и производственных зданий (I и II классы по НРБ-99). Так, значение $A_{эфф}$ в неотъемлемом компоненте глазурованной керамической плитки – циркониевых концентратах из сырья разных месторождений составляет обычно 3500–5500 Бк/кг, а в некоторых марках пигментов для изготовления цветной плитки оно может превышать 8000 Бк/кг [1]. То есть $A_{эфф}$ в этих компонентах облицовочных изделий превышает допустимое значение 1500–4000 Бк/кг даже для строительных материалов III и IV классов по НРБ-99.

Строго говоря, если к этим специальным материалам применить требования п. 5.3.4 НРБ-99 буквально, то их использование в производстве облицовочных изделий вообще недопустимо. С другой стороны, без использования этих компонентов производство современных высококачественных облицовочных изделий и материалов просто невозможно. Поэтому до сих пор гигиеническая оценка облицовочных изделий по показателям радиационной безопасности проводилась по средним значениям $A_{эфф}$ в них как для традиционных строительных изделий и материалов. Это вполне устраивало как потребителей и производителей продукции, так и надзорные органы до тех пор, пока на рынке не стали появляться высокохудожественные облицовочные изделия и материалы со средними значения-

ми эффективной удельной активности природных радионуклидов 500–600 Бк/кг и более.

Постепенное истощение запасов циркониевого сырья традиционных месторождений, очевидно, приведет к вовлечению в производство облицовочных изделий и материалов сырья со значительно более высоким содержанием природных радионуклидов [1], что неизбежно приведет к росту $A_{эфф}$ и в самих изделиях. Вероятно, с учетом характера использования этих изделий, это не приведет к превышению значений мощности дозы выше установленных для жилых помещений пределов, однако это требует обоснования.

Очевидно, что выходом из этой ситуации является установление прямых нормативов на содержание природных радионуклидов в самих облицовочных изделиях и материалах с учетом характера их использования и ожидаемых доз облучения населения. В настоящей публикации нами сделана попытка обосновать такой норматив, исходя из того, что максимальная дополнительная доза природного облучения населения за счет использования этих изделий и материалов не должна превышать 0,1 мЗв/год. Фактически это является развитием положений п. 5.1.4 СП 2.6.1.1292-03 и п. 5.2.13 ОСПОРБ-99: при использовании изделий и материалов, содержащих природные радионуклиды, для которых в НРБ-99 не установлены нормативы, должна быть выполнена оценка доз облучения населения.

К сожалению, в СП 2.6.1.1292-03 и ОСПОРБ-99 нет дозового предела, на соответствие которому и следует проводить гигиеническую оценку продукции в таких случаях. В неявном виде такой дозовый предел 0,1 мЗв/год в форме уровня вмешательства по содержанию радионуклидов есть в НРБ-99, правда, только для питьевой воды. Нам представляется, что такой гигиенический норматив в ранге «уровня вмешательства» или «уровня исключения», ниже которого не требуются никакие мероприятия по снижению содержания природных радионуклидов в продукции, для которой прямые нормативы не установлены, целесообразно ввести при переработке действующих нормативных документов.

В расчетах по обоснованию нормативов на содержание природных радионуклидов в облицовочных изделиях и материалах мы исходили из следующих основных предпосылок:

1. Применение облицовочных изделий и материалов для отделки помещений приводит к увеличению дозы природного облучения населения, если эффективная удельная активность природных радионуклидов в них выше, чем в основных строительных материалах.

2. Дополнительная доза природного облучения населения за счет использования облицовочных изделий и материалов в коммунальных условиях и быту не должна превышать 0,1 мЗв/год.

3. Облицовочные изделия имеют незначительную толщину, так что в расчетах по оценке доз облучения населения самопоглощением гамма-излучения в их объеме можно пренебречь.

4. Активность природных радионуклидов равномерно распределена по внутренней поверхности ограждений помещения (изделия однородны по величине $A_{эфф}$).

5. Дополнительная доза облучения людей формируется только за счет внешнего гамма-излучения изделий (коэффициент эманирования радона для глазурованных керамических изделий, а также для изделий из природного камня составляет менее 10% [2, 3], так что поступлением радона в воздух помещений можно пренебречь).

6. При значениях $A_{эфф}$ менее 370 Бк/кг облицовочные изделия и материалы не вносят дополнительного вклада в облучение людей, поскольку материалы с таким содержанием природных радионуклидов допускаются для любого вида строительства в соответствии с НРБ-99.

Очевидно, что при этих условиях уровень вмешательства 0,1 мЗв/год не будет превышен и для производственных помещений, в которых время облучения людей примерно в 4 раза меньше (составляет до 2000 час/год).

Исходя из этого, для расчета величины дополнительной эффективной дозы природного облучения населения (E) за счет использования облицовочных изделий и материалов получена формула:

$$E = 8800 \cdot 0,8 \cdot 0,61 \cdot 10^{-5} \cdot \dot{X} \approx 0,043 \cdot \dot{X}, \text{ мЗв/год}, \quad (1)$$

в которой \dot{X} – мощность экспозиционной дозы гамма-излучения в центре помещения (нормируемая величина в зданиях), создаваемая природными радионуклидами, которые содержатся в облицовочных изделиях (мкР/ч); 8800 – число часов в году; 0,8 – доля времени, которое человек проводит в помещении [3]; $0,61 \cdot 10^{-5}$ – соотношение между мощностью эффективной и экспозиционной дозы для спектра гамма-излучения природных радионуклидов (мЗв/мкР) [4].

С учетом этого, рассмотрим далее помещение без окон и дверей (наиболее консервативный вариант) шириной a , длиной b и высотой h (м). Поместив систему координат в геометрическом центре помещения, для расстояния от центра помещения до произвольной точки с координатами $(x, y, h/2)$ на поверхности потолка получим выражение:

$$r^2 = x^2 + y^2 + (h/2)^2. \quad (2)$$

Мощность экспозиционной дозы гамма-излучения в центре помещения от элемента облицовки площадью $(dx \cdot dy)$ с координатами $(x, y, h/2)$ на поверхности потолка составит [5]:

$$d\dot{X} = K \cdot \frac{dx \cdot dy}{x^2 + y^2 + (h/2)^2}, \text{ мкР/ч}. \quad (3)$$

В формуле (3) приняты обозначения:

$$K = 2,44 \cdot 10^{-5} \cdot \Delta \cdot \rho \cdot A_{эфф}, \text{ мкР/ч}; \quad (4)$$

Δ – толщина облицовочных изделий, м;

ρ – плотность облицовочных изделий в кг/м³;

$A_{эфф}$ – то же, что и выше, Бк/кг.

Численный коэффициент $K = 2,44 \cdot 10^{-5}$ в (3) соответствует мощности экспозиционной дозы гамма-излучения на расстоянии 1 м от точечного источника ²²⁶Ra активностью 1 Бк. При этом учтено, что по мощности дозы гамма-излучения источник активностью $A_{эфф}$ для смеси природных радионуклидов эквивалентен источнику ²²⁶Ra такой же активности [6]. Физический смысл параметра $\Delta \cdot \rho \cdot A_{эфф} = m \cdot A_{эфф}$, имеющего размерность Бк/м², – эффективная активность природных радионуклидов, отнесенная к единице площади облицовки помещения ($\Delta \cdot \rho = m$ – масса изделия, отнесенная к площади его лицевой стороны, кг/м²). С учетом этого из формулы (3) следует, что при незначительных толщинах облицовочных изделий, когда самопоглощением гамма-излучения в изделиях можно пренебречь, мощность дозы гамма-излучения в помещении будет определяться активностью природных радионуклидов, содержащихся в единице площади облицованной поверхности ограждений. Это означает, что правильнее было бы устанавливать нормативы на содержание природных радионуклидов в облицовочных изделиях не по величине $A_{эфф}$ в них, а по величине $A_{эфф} \cdot m$. К обсуждению этого вопроса целесообразно вернуться позже, здесь же мы рассмотрим традиционно определяемую для строительных изделий и материалов величину $A_{эфф}$.

С учетом выражения (3) из [7] для расчета мощности дозы гамма-излучения в центре помещения за счет облицовки пола и потолка может быть получена формула:

$$\dot{X}_h = 8 \cdot K \cdot \int_0^{b/2} dy \int_0^{a/2} \frac{dx}{x^2 + y^2 + (h/2)^2}, \text{ мкР/ч}, \quad (5)$$

в которой численный коэффициент 8 учитывает две одинаково излучающие поверхности (пол и потолок) и изменение пределов интегрирования четной подынтегральной функции. Аналогично можно получить формулы для вклада в мощность дозы в центре помещения гамма-излучения от двух других пар стен – \dot{X}_a и \dot{X}_b . Тогда мощность дозы гамма-излучения в центре помещения определится суммой $\dot{X} = \dot{X}_a + \dot{X}_b + \dot{X}_h$, которую можно привести к следующему виду:

$$\dot{X}_m = 8K \left[\int_0^{b/2} dy \int_0^{a/2} \frac{dx}{x^2 + y^2 + (h/2)^2} + \int_0^{a/2} dx \int_0^{h/2} \frac{dz}{x^2 + z^2 + (b/2)^2} + \int_0^{h/2} dz \int_0^{b/2} \frac{dy}{y^2 + z^2 + (a/2)^2} \right] \quad (6)$$

Для помещения кубической формы, когда $b=h=a=c$, все три интеграла в квадратной скобке равны и формула (6) принимает более простой вид:

$$\dot{X}_{\text{куб}} = 24K \int_0^{c/2} dy \int_0^{c/2} \frac{dx}{x^2 + y^2 + (c/2)^2}. \quad (7)$$

Для мощности дозы в помещении сферической формы формула для расчета мощности дозы гамма-излучения в его центре может быть получена в аналитической форме:

$$\begin{aligned} \dot{X}_{\text{сф}} &= 4\pi \cdot K = 4\pi \cdot 2,44 \cdot 10^{-5} \cdot \Delta \cdot \rho \cdot A_{\text{эфф}} \approx, \\ &\approx 3,06 \cdot 10^{-4} \cdot \Delta \cdot \rho \cdot A_{\text{эфф}}, \text{ мкР/ч.} \end{aligned} \quad (8)$$

Из формулы (8) следует, что мощность дозы гамма-излучения в центре сферического помещения за счет содержания природных радионуклидов в его облицовке не зависит от размеров помещения. Это связано с двумя причинами. Во-первых, мощность дозы от элемента облицовки обратно пропорциональна квадрату расстояния до него, а площадь облицовки прямо пропорциональна квадрату радиуса сферы, так что отношение площади поверхности такого помещения к квадрату его радиуса является постоянной величиной и от радиуса помещения не зависит. Во-вторых, в расчетах нами не учитывалось самопоглощение фотонов в облицовочных изделиях и их поглощение в воздухе, а также экранирование изделиями излучения материала стен, что обеспечивает определенный запас при оценке допустимого значения $A_{\text{эфф}}$ по формулам (6), (7) и (8).

Из общего анализа формул (6), (7) и (8) можно показать, что при прочих равных условиях (одинаковые площади поверхности ограждений, толщина облицовочных изделий и величина $A_{\text{эфф}}$ в изделиях), мощность дозы гамма-излучения в помещении в форме параллелепипеда будет выше, чем в помещении кубической формы, а в помещении сферической формы она будет еще меньше. Покажем это для помещений в форме сферы и куба.

В самом деле, поскольку в сферическом помещении все точки на поверхности облицовки равно удалены от центра помещения, то среднее расстояние до элемента облицовки в нем равно радиусу помещения R . Условие равенства площади поверхности ограждений для помещений в форме сферы и куба является $4\pi R^2 = 24a^2$, в котором a – половина высоты кубического помещения, которая равна минимальному значению расстояния от элемента облицовки до центра помещения. Поскольку мощность дозы обратно пропорциональна квадрату расстояния до элемента облицовки, определим среднее значение квадрата расстояния от центра кубического помещения до его поверхности, которое определяется соотношением:

$$\begin{aligned} \overline{R_{\text{куб}}^2} &= a^{-2} \int_0^a dx \int_0^a dy (a^2 + x^2 + y^2) = \frac{5}{3} a^2 = \\ &= \frac{5}{3} \cdot \frac{4\pi R^2}{24} = \frac{5\pi R^2}{18} < R^2. \end{aligned}$$

Из полученного выражения следует, что среднее расстояние квадрата расстояния от центра кубического помещения до поверхности его облицовки меньше, чем для сферического помещения, поэтому при одинаковой площади поверхности ограждений мощность дозы в помеще-

нии в форме куба будет выше. Аналогично можно показать, что в помещении в форме параллелепипеда мощность дозы будет выше, чем в помещении в форме куба. Тогда для мощности дозы в центре помещений разной формы будет справедливо соотношение:

$$\dot{X}_{\text{сф}} < \dot{X}_{\text{куб}} < \dot{X}_{\text{м}}. \quad (9)$$

Поскольку интегралы (6) и (7) в аналитическом виде взять нельзя, оценку допустимого значения $A_{\text{эфф}}$ в облицовочных материалах получим из формулы (8) с учетом соотношения (9) путем численного интегрирования (6) и (7), убедившись вначале в их корректности.

Оценка корректности полученных соотношений нами выполнена путем сравнения результатов расчетов и прямых измерений мощности дозы на фиксированном расстоянии от элемента облицованной поверхности пола. В одном случае для этого в центре помещения площадью около 40 м² на заданной высоте от поверхности пола был установлен дозиметр, с помощью которого проводилось измерение мощности дозы гамма-излучения. После этого на поверхности пола выкладывался элемент облицовки из стандартной глазурованной керамической плитки толщиной 7 мм с известным содержанием природных радионуклидов так, чтобы дозиметр оказался над геометрическим центром элемента облицовки, и измерения мощности дозы повторялись снова. В другом случае для облицовки элемента пола использованы блоки из природного камня толщиной 30 мм. В этой модели измерения мощности дозы проводились на разной высоте от поверхности облицовки. Для расчета мощности дозы над поверхностью элемента облицованного пола из (5) с учетом [7] может быть получена формула:

$$\dot{H}_{\text{модель}} = 4 \cdot K \cdot \int_0^{b/2} dy \int_0^{a/2} \frac{dx}{x^2 + y^2 + h^2}, \text{ мкР/ч,} \quad (10)$$

где величины a и b имеют смысл длины и ширины элемента облицовки, а h – высота от поверхности облицовки до точки измерения мощности дозы. Плотность керамической плитки равна 1,812 г/см³, а гранитного материала – 2,380 г/см³, так что значение 4*К в формуле (10) для элемента керамической облицовки составляет 0,241, а для гранитной – 4,251 мкР/ч. Результаты расчетов и измерений для обеих моделей приведены в табл. 1.

В последнем столбце табл. 1 для сравнения приведено расчетное значение мощности дозы для точечного источника, в котором сосредоточена вся активность элемента облицовки. Очевидно, что расчетное значение мощности дозы для точечного источника должно быть выше, чем для распределенного источника с такой же активностью $A_{\text{эфф}}$, что и видно по данным табл. 1. Как следует из данных табл. 1, в целом, совпадение расчетных и измеренных значений мощности дозы от элемента облицовки пола уже для расстояний более 50 см вполне удовлетворительно, особенно если учесть, что эти измерения выполнены при достаточно низких значениях мощности дозы. Несколько более высокие измеренные значения мощности дозы по сравнению с излучением точечного источника на высоте более 50 см от элемента облицовки связаны с изменением геометрии измерений по мере увеличения расстояния до него.

Результаты измерений и расчетов мощности дозы над элементом облицовки пола

| Облицовочные изделия | A _{эфф} , Бк/кг | Размеры элемента облицовки | Высота от центра облицовки, см | Результаты измерений и расчетов | | |
|---|--------------------------|----------------------------------|--------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|-------------------------------|
| | | | | $\Delta \dot{X}_{изм}$, мкР/ч | $\Delta \dot{X}_{расч}$, мкР/ч | $\Delta \dot{X}_{mm}$, мкР/ч |
| Глазурованная керамическая плитка толщиной 7 мм | 195 ± 20 | 1,0x0,9 м (0,9 м ²) | 74,7 | 0,20±0,04 | 0,09 | 0,11 |
| | | | 10,0 | 8,90±1,78 | 11,24 | 75,53 |
| Блоки из природного камня толщиной 30 мм | 610 ± 60 | 0,8x0,8 м (0,64 м ²) | 50,0 | 3,50±0,70 | 2,19 | 3,01 |
| | | | 100,0 | 1,40±0,28 | 0,68 | 0,75 |

Далее из соотношения (9) получим значения коэффициентов пересчета для мощности дозы при переходе от помещений в форме параллелепипеда к помещениям в форме куба и сферы. Для этого рассмотрим вначале помещения в форме бесконечной трубы круглого, квадратного и прямоугольного сечения. Интеграл (6) для таких помещений может быть взят в аналитической форме и имеет следующий вид.

Для помещения в форме бесконечного цилиндра:

$$\dot{X}_{\text{ци}} = 2K \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^{\infty} \frac{dy}{y^2 + R^2} = 2\pi^2 K. \quad (11)$$

Для помещения квадратного сечения бесконечной длины:

$$\begin{aligned} \dot{X}_{\text{квт}} &= 16K \int_0^{a/2} dx \int_0^{\infty} \frac{dy}{x^2 + y^2 + (a/2)^2} = \\ &= 8\pi K \int_0^{a/2} \frac{dx}{\sqrt{(a/2)^2 + x^2}} = 8\pi K \cdot \ln(1 + \sqrt{2}) \end{aligned} \quad (12)$$

Для помещения прямоугольного сечения бесконечной длины:

$$\begin{aligned} \dot{X}_{\text{пр}} &= 4\pi K \cdot \ln \left[\left[(a/b) + \sqrt{1 + (a/b)^2} \right] \cdot \right. \\ &\left. \cdot \left[(b/a) + \sqrt{1 + (b/a)^2} \right] \right]. \end{aligned} \quad (13)$$

Для значений отношения a/b от 1 (помещение квадратного сечения) до 10 (помещение очень вытянутого прямоугольного сечения) отношение $\dot{X}_{\text{пр}} / \dot{X}_{\text{квт}}$ находится в пределах от 1,00 до 1,43. Отношение $\dot{X}_{\text{пр}} / \dot{X}_{\text{ци}}$ для тех же значений a/b меняется в пределах от 1,13 до 1,60, а значение $\dot{X}_{\text{квт}} / \dot{X}_{\text{ци}}$ составляет 1,13. Из этого следует, что при прочих равных условиях мощность дозы гамма-излучения в помещении в форме бесконечной трубы прямоугольного сечения будет примерно в 1,4 раза больше мощности дозы в помещении квадратного сечения, которая примерно на 13% выше мощности дозы в помещении круглого сечения. Таким образом, для помещений в форме бесконечной трубы прямоугольного сечения в качестве занижающего коэффициента может быть принята величина 1,5.

Рассмотрим такую же оценку для помещений конечных размеров. Для этого выполним численное интегриро-

вание в (6) и (7) для помещений в форме куба и параллелепипеда, рассмотрев двойной интеграл:

$$\int_{-b}^b \int_{-a}^a \frac{dx \cdot dy}{x^2 + y^2 + c}. \quad (14)$$

Переход к полярным координатам в данном случае не принесит желаемого результата, поэтому после интегрирования его по x получим выражение:

$$\int_{-a}^a \frac{2 \arctg(a / \sqrt{y^2 + c})}{\sqrt{y^2 + c}} \cdot dy. \quad (15)$$

Взять последний интеграл в аналитическом виде не удастся, а все классические методы интегрирования таких функций лишь усложняют подынтегральное выражение, поэтому воспользуемся методами численного интегрирования. Известно множество способов вычисления приближенного значения определенных интегралов. Наиболее точные из них используют разделение подынтегральной функции на произведение двух других, одна из которых вносит наибольший вклад в абсолютное значение исходной функции, другая же описывает особенности ее траектории [8]. В рассматриваемой функции такое разделение бесполезно в связи с наличием иррациональности как в знаменателе, так и в числителе. Поэтому в решении рассматриваемой задачи остается два основных пути.

Во-первых, можно рассмотреть представление подынтегральной функции в виде, например ряда Тейлора или Фурье, либо интерполировать ее методом Ньютона, Лагранжа, тригонометрических полиномов или сплайнов. Для достижения наилучшей степени точности в первом случае необходимо рассмотреть достаточно большое количество слагаемых, прежде чем совершать предельный переход, во втором – взять множество узлов из рассматриваемого промежутка. Во-вторых, можно непосредственно перейти к приближенному интегрированию.

Для этого рассмотрим график исходной функции $1/(x^2 + y^2 + c)$ для случая кубического помещения с размерами 10x10x10 м и разобьем его на 9 соответствующих параллелепипедов (3 по оси x и 3 по оси y) с учетом особенностей поведения функции вблизи своего максимума и ее гладкости. Полученная картина полностью корректна в применении к рассматриваемой задаче. Значение интеграла при таком разбиении составляет 1,4153. Уменьшая шаг разбиения, получим ряд значений, асимптотически сходящихся к величине 1,4074.

Перейдя от сужения к исходной функции, применим данную модель, увеличивая число разбивающих параллелепипедов до 100, для чего воспользуемся математическими пакетами (системами для научной работы) [8]. Выбор конкретного пакета в данном случае не важен, поскольку модель уже построена и нуждается фактически только в расчетах. Тем не менее, требуемое количество итераций достаточно велико для расчетов вручную. Поэтому вначале для выбранного кубического помещения выполним проверку адекватности, точности и правильности формализации модели при переходе от 90° к 360°: значение интеграла должно увеличиться в 4 раза.

Для числа разбиений 100 получим значение 5,6413. Будем уменьшать шаг разбиения до тех пор, пока значения рассматриваемой функции не войдут в определенную ε-трубку или будут стремиться к постоянному предельному значению. С помощью математических пакетов можно получить результат фактически любой степени точности. Ограничимся четырьмя знаками после запятой и получим значение 5,6296, которое отличается от полученного ранее результата лишь на 0,2%. Сравнивая это с первоначальным результатом, получим $1,4074 \times 4 = 5,6296$, что полностью оправдывает ожидания.

Рассмотрим далее случай помещения в форме прямоугольного параллелепипеда размерами, например, 10x30x10 м, причем вследствие более быстрого стремления к максимуму со сторон, соответствующих меньшим граням помещения, для наиболее верного приближения, рассмотрим его разбиение не на 100, а на 400 параллелепипедов. Полученный результат составит 7,7675, а его наиболее точное значение составит 7,7648.

Тогда для помещений в форме куба и параллелепипеда получим отношение результатов численного интегрирования: $7,7648/5,6296 = 1,379$. Эта величина фактически совпадает с полученным выше отношением для помещений в форме бесконечных труб круглого и прямоугольного сечений. Таким образом, в качестве коэффициента запаса при переходе от помещений в форме сферы к помещениям в форме куба и параллелепипеда конечных размеров вполне приемлемо взять значение 1,4.

С учетом этого далее, используя формулы (1) и (8), получим оценку допустимого значения для величины $A_{эфф}$ в облицовочных материалах для сферического помещения:

$$A_{эфф} \leq \frac{0,1}{1,317 \cdot 10^{-5} \cdot \Delta \cdot \rho}, \text{ Бк/кг.} \quad (16)$$

Для этого учтем, что толщина керамической и керамогранитной плитки по ГОСТ 6787-2001 и ГОСТ 6141-91, а также изделий из природного и искусственного камня для облицовки стен обычно составляет 7–10 мм (7 мм – плитка для стен, 9–10 мм – толщина бордюров и плитки для пола), а толщина облицовочных изделий из природного камня для облицовки пола не превышает 30 мм. Приняв плотность керамической и керамогранитной плитки, равной 1,8 г/см³, изделий из искусственного камня – 2,0 г/см³, а плотность изделий из природного камня, равной 2,4 г/см³, получим оценку диапазона допустимых значений $A_{эфф}$ в облицовочных изделиях и материалах. Результаты этих расчетов в обобщенном виде приведены в табл. 2.

Выполним далее оценку запаса данных табл. 2, которые получены для самого неблагоприятного случая. Во-первых, практически во всех случаях облицовка занимает обычно не более половины общей площади внутренней поверхности стен ($k_1 \approx 2$). Во-вторых, в жилых зданиях облицовкой покрывают стены и полы в кухонных помещениях, ванных и туалетных комнатах, в которых жители едва ли проводят половину от общего времени их пребывания в зданиях ($k_2 \approx 2$). В-третьих, чем толще облицовочные изделия, тем выше самопоглощение излучения в самом материале изделий и экранирование ими излучения основных материалов ограждений. Так, для изделий из природного камня толщиной 30 мм мощность дозы за счет этих факторов снижается как минимум на 30% ($k_3 \approx 1,4$).

Кроме того, изделия и материалы толщиной 30 мм обычно используются только для покрытия полов, площадь которых для помещений разных размеров и форм составляет от 10 до 20% от общей площади поверхности ограждений [6]. Причем природный камень для облицовки стен и потолков используется обычно в помещениях достаточно больших размеров (обычно десятки метров), когда заметным становится поглощение гамма-излучения в воздухе.

Таким образом, суммарный запас в оценке численных значений $A_{эфф}$ в табл. 2 составляет не менее 5,6. Исходя из этого, вполне приемлемым будет в качестве допустимого содержания природных радионуклидов в облицовочных изделиях и материалах принять значение $A_{эфф}$ на уровне до 740 Бк/кг как для строительных материалов II класса по НРБ-99. Эта величина получена для помещений в форме прямоугольного параллелепипеда, так что для помещений других форм она имеет значительный запас.

Таблица 2

Результаты оценки допустимых значений содержания природных радионуклидов в облицовочных изделиях и материалах, Бк/кг

| Облицовочные изделия | ρ , г/см ³ | D, мм | Помещение в форме | |
|--|----------------------------|-------|-------------------|--------------------------|
| | | | сферы | куба или параллелепипеда |
| Керамическая и керамогранитная плитка для стен | 1,8 | 7 | 920 | 660 |
| Керамическая и керамогранитная плитка для пола | 1,8 | 10 | 640 | 460 |
| Искусственный камень | 2,0 | 10 | 380 | 270 |
| Природный камень для облицовки стен | 2,4 | 10 | 320 | 230 |
| Природный камень для облицовки пола | 2,4 | 30 | 105 | 75 |

Полученная оценка $A_{эфф}$ хорошо согласуется с теоретическими и экспериментальными данными [10], где показано, что при содержании ^{226}Ra в глазурованных керамических изделиях до 1000 Бк/кг годовая эффективная доза облучения жителей в жилых помещениях с постоянным пребыванием людей в течение 80% времени не превысит 0,3 мЗв. Отметим, что в плане внешнего облучения людей физическая величина $A_{эфф}$ является эквивалентом содержания ^{226}Ra в строительных материалах [2, 6].

Таким образом, на основании измерений и расчетов получено, что в качестве норматива по содержанию природных радионуклидов в облицовочных изделиях и материалах может быть принято значение $A_{эфф}$ до 740 Бк/кг. В принципе, эту величину необязательно было бы принимать совпадающей с допустимым содержанием природных радионуклидов в строительных материалах II класса. Однако нам представляется нецелесообразным введение еще одного норматива в дополнение к принятым в НРБ-99, тем более что величина 740 Бк/кг, как указано выше, имеет достаточно хороший запас. По этим же причинам считаем нецелесообразным более либеральное значение этого норматива, поскольку следующим численным значением $A_{эфф}$ в НРБ-99 является 1500 Бк/кг.

Отметим в заключение также, что значение $A_{эфф}$ до 740 Бк/кг может применяться не только в отношении традиционных облицовочных изделий и материалов, но также и красок и лаков. Можно показать, что для этих материалов, наносимых на поверхность стен обычно слоем значительно меньше 1 мм, расчетные значения $A_{эфф}$ в последнем столбце табл. 2 будут приблизительно на порядок выше, так что при $A_{эфф}$ до 740 Бк/кг внешнее облучение людей за счет окрашенных ограждений будет пренебрежимо малым. При этом на основе данных [6] также можно

показать, что даже при значительном эманировании радона и торона из красок вклад ингаляционного поступления их дочерних продуктов в облучение людей будет значительно ниже 0,1 мЗв/год.

Список использованной литературы

1. Лисаченко, Э.П. Радиационно-гигиеническая оценка современного производства керамики [Текст] / Э.П. Лисаченко, И.П. Стамат, И.Г. Матвеева // Радиационная гигиена: Сборник научных трудов. – СПб: ФГУН НИИРГ им. проф.П.В. Рамзаева. – 2008. – Т. 1, № 3. – С. 31-35.
2. Исследование и гигиеническая оценка уровней радиационного воздействия на население РСФСР естественных радионуклидов и космического излучения [Текст]: Отчет заключительный. № Гос. регистрации 76002776, Инв. № Б998679 от 21.10.1981.
3. Источники и эффекты ионизирующего излучения [Текст]: Отчет НКДАР ООН – 2000, Т. 1. Нью-Йорк 2000.
4. Оценка индивидуальных эффективных доз облучения населения за счет природных источников ионизирующего излучения [Текст]: Методические указания (МУ 2.6.1.1088-2002). – М.: Минздрав России, 2002. – 23 с.
5. Гусев, Н.Г. Защита от ионизирующих излучений [Текст] / Н.Г. Гусев, В.А. Климанов, В.П. Машкович [и др.]. // Физические основы защиты от излучений. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – Т. 1.
6. Крисюк, Э.М. Радиационный фон помещений [Текст] / Э.М. Крисюк. – М.: Энергоатомиздат, 1989.
7. Бахвалов, Н.С. Численные методы [Текст] / Н.С. Бахвалов – М.: Наука, 1975.
8. Бахвалов, Н.С. Численные методы [Текст] / Н.С. Бахвалов, Н.П. Жидков, Г.М. Кобельков. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2006.
9. Yahong, Mao. Physical Models and Limits of Radionuclides for decorative building Materials [Текст] / Mao Yahong, Liu Yigang, Fu Yuchuan [et al.]. // Health Phys. – 2006. – V. 90, № 5. – P. 47.

I.P. Stamat¹, D.I. Stamat²

On justification of standards for natural radionuclide concentration in facing products and materials

¹Federal Scientific Organization «Saint-Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev» of Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Well-being, Saint-Petersburg

²St. Petersburg State University, St. Petersburg

Abstract. The article addresses issues of the population radiation protection regulatory framework development for the natural sources of radiation. Calculations for justification of standard for natural radionuclide concentration in the wide range of contemporary building materials – facing products – are formulated. The basic consideration of calculations is that implementation of these products could lead to the additional population exposure from natural sources less than 0,1 mSv/year. On the base of this assumption it is shown that effective specific activity of natural radionuclides in these products must not exceed 740 Bq/kg.

Key words: natural irradiation sources, natural radionuclides, radon isotopes, facing products and materials, gamma radiation dose rate, effective exposure dose from natural irradiation sources.

И.П. Стамат
Тел. (812) 232-4329 E-mail: istamat@mail.ru

Поступила 13.01.09