

стандартных размеров, а работы по монтажу опалубки производить без применения башенных кранов (кроме монтажных ферм).

Кроме широких возможностей применения ее для бетонирования различных конструкций, опалубка универсальна и по технологии работ: может собираться как вручную, так и монтироваться без переборок на элементы крупноразмерными панелями и блоками, в том числе и замкнутыми, для чего применяются угловые вставки и блокирующие элементы. Опалубка колонн имеет несколько опалубочных сечений: от 300×300 до 600×600 мм, высоту — от 2,8 до 4,2 м.

Примеры реализуемых и разрабатываемых проектов в АКТСД «ВАНТ»:

1. Бизнес-центр в г. Гродно
2. Жилой дом в м-не «Румлево» г. Гродно
3. 2-хсекционный 10-этажный жилой дом в г. Бресте
4. Жилой дом по ул. Димитрова в г. Минске
5. Жилой дом с встроенным блоком обслуживания по ул. Болдина в г. Гродно

УДК 691.32:539.16.04  
Лукутцова Н.П.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ СОДЕРЖАНИЯ РАДОНА В ВОЗДУХЕ ПОМЕЩЕНИЙ

Одна из причин повышенного внимания в последнее время к проблеме радона — выявление особой роли радона в облучении людей в бытовых условиях и на производствах, казалось бы далёких от радиационно опасных технологий [1].

Радон и другие продукты распада радия, непрерывно образующиеся в строительных материалах, частично выделяются в поры и трещины и поступают в воздух.

Процесс миграции (эксхалаяции) радона из строительных материалов можно разделить на 2 этапа [2]: эманирование радона во внутренние поры материала и диффузия атомов радона по этим порам с последующим выходом из материала. Разделение на 2 этапа оправдано тем, что коэффициент диффузии радона внутри вещества крайне мал, и поэтому из материала выходят практически те атомы радона, которые попали во внутренние поры за счёт агрегатной отдачи при  $\alpha$ -распаде радона. При перепаде концентраций возникает явление диффузии. Диффузия является одним из основных процессов, способствующих перемещению радона из строительных конструкций.

Решение задачи эксхалаяции радона для одного слоя конечной толщины рассматривается в работе Э. М. Крисюком [2], с использованием эмпирического метода.

При рассмотрении эксхалаяции радона из стен и перекрытий помещения можно считать, что диффузионный перенос радона осуществляется только в направлении, перпендикулярном к поверхности стены (по координате  $x$ ). Потоки радона, параллельные поверхности стены взаимно уравниваются друг друга. Краевые эффекты не существенны, так как высота и ширина стен значительно больше их толщины.

Одномерное уравнение диффузии радона в пористой среде имеет вид:

$$\frac{\partial C_0}{\partial t} = \lambda_0 C_{max} - \lambda_0 C_0 + \frac{D}{\rho} \frac{\partial^2 C_0}{\partial x^2} \quad (1)$$

где:  $C_{max} = C_{Ra} \cdot K_{эм} \cdot (\rho/\Pi)$  — максимально возможная активность радона в воздухе, находящемся в порах материала, Бк/м<sup>3</sup>;

$C_{Ra}$  — удельная активность радия в материале, Бк/кг;  $\rho$  — плотность материала, кг/м<sup>3</sup>;  $K_{эм}$  — коэффициент эманирования;  $\Pi$  — пористость материала;  $\lambda_0$  — постоянная распада радона, с<sup>-1</sup>;  $D$  — коэффициент диффузии.

Решение стационарного уравнения диффузии радона имеет вид:

$$C_o(x) = C_{max} \left[ \frac{1 - \frac{ch(x/L_0) \cdot \alpha \cdot \beta}{1 + \frac{ch(d/L_0) \cdot \alpha \cdot \beta}{th\beta}}}{\alpha \cdot \beta} \right] \quad (2)$$

Объёмная активность радона во внешнем воздухе равна

$$C_o(x)|_{x=d} = C_o = C_{max} \left[ \frac{1 - \frac{\alpha \cdot \beta}{th\beta}}{1 + \frac{\alpha \cdot \beta}{th\beta}} \right] \quad (3)$$

а скорость эксхалляции радона

$$-D \frac{\partial C_o(x)}{\partial x} \Big|_{x=d} = q = q_{max} \cdot \alpha \left[ \frac{1 - \frac{\alpha \cdot \beta}{th\beta}}{1 + \frac{\alpha \cdot \beta}{th\beta}} \right] \quad (4)$$

где:  $q_{max} = C_{Ra} \cdot K_{эм} \cdot \rho \cdot \lambda_0 \cdot d$  — максимально возможная скорость эксхалляции, соответствующая случаю выхода из материала всех атомов радона, попавших во внутренние поры;

$\alpha = 1/(d \cdot \rho)$  — отношение объёмов воздуха во внешнем пространстве и внутри половины стены;

$\beta = d/L_0$  — отношение половины толщины стены к длине диффузии радона;

$L_0 = \sqrt{D/(\rho \cdot \lambda_0)}$  — длина диффузии радона в пористой среде.

Ограждающие конструкции современных зданий являются многослойными, состоящими из двух и более слоёв. Стены из силикатного и керамического кирпича с внутренней стороны выравнивают строительным раствором. А керамзитобетонные панели имеют с двух сторон защитный слой из цементно-песчаного раствора толщиной по 2 см каждый. Во всём мире многослойные панели с внутренним теплоизоляционным и наружными защитными слоями являются самыми распространёнными, так как сочетают конструкционные свойства с теплотехническими характеристиками. В последнее время керамзитобетонные панели в Брянском регионе выпускаются многослойными, с внутренним слоем из пенополиуретана толщиной 10 см.

Учитывая многослойность ограждающих конструкций, рассмотрен вопрос эксхалляции радона с учётом этого фактора.

Для расчета скорости эксхалляции радона из многослойных материалов объёмной (при  $\lambda_0 = 1,4 \cdot 10^{-4}$  с<sup>-1</sup>) и эквивалентной равновесной объёмной активности радона в помещении была разработана и реализована программа на языке Turbo Paskal.

Объёмная активность радона и плотность потока радона с поверхности строительного материала будет зависеть от многих факторов: структурных, конструктивных, характеристики помещения, кратности воздухообмена, времени года и др.

К числу структурных факторов относятся: содержание радия в материале, коэффициент эманирования, плотность материала, пористость. К конструкционным — количество слоев материалов и их расположение, наличие и расположения отделочного слоя.

Немаловажным фактором является характеристика помещения: отношение площади помещения к его объему, количество наружных и внутренних стен, этажность, наличие подвала. Учесть все эти факторы одновременно очень сложно. Разработанная программа учитывает большинство из них. А главное — она позволяет выявить особенности различных видов строительных материалов, их взаимного расположения в конструкции стен и роль отделочных слоев в формировании радиационного фона помещения.

Для расчета были выбраны следующие виды наиболее распространенных строительных материалов: керамзитобетон, силикатный и керамический кирпич, золобетон, ячеистый бетон, тяжелый бетон. В качестве отделочного материала был принят цементно-песчаный раствор.

Отделочные слои могут располагаться внутри, снаружи и с двух сторон.

Толщина слоев менялась в зависимости от вида используемой отделки.

Как показали результаты расчета, отделочные слои цементно-песчаного раствора на поверхности стеновых материалов существенно влияют на формирование радиационного фона помещения и поэтому рассматривались с точки зрения соотношения плотности материала  $\rho_o^M$  и плотности отделочного слоя  $\rho_o^{отд}$ . При этом возможны следующие варианты.

1. Плотность материала больше плотности отделочного слоя  $\rho_o^M > \rho_o^{отд}$ . Это характерно для тяжелого бетона и слоя строительного раствора на его поверхности.
2. Плотность материала меньше плотности отделочного слоя  $\rho_o^M < \rho_o^{отд}$ , например, для ячеистого бетона и строительного раствора.
3. Плотность материалов примерно одинаковая  $\rho_o^M \approx \rho_o^{отд}$ , что характерно для силикатного кирпича и строительного раствора.

Как показали расчеты, при  $\rho_o^M > \rho_o^{отд}$  нанесение отделочного слоя раствора толщиной 2 см на поверхность тяжелого бетона приводит к увеличению плотности потока радона с 13 до 16,3 мБк/(м<sup>2</sup>·с) и объемной активности радона с 23 до 29 Бк/м<sup>3</sup>.

При  $\rho_o^M < \rho_o^{отд}$  нанесение отделочного слоя строительного раствора толщиной 2 см на поверхность ячеистого бетона приводит к снижению  $q$  с 2,2 до 1,4 мБк/(м<sup>2</sup>·с) и с 3,9 до 2,4 Бк/м<sup>3</sup>. Для золобетона без отделочного слоя  $q = 11,2$  мБк/(м<sup>2</sup>·с) и  $C_o = 20$  Бк/м<sup>3</sup>, а с отделочным слоем строительного раствора толщиной 2 см  $q = 2,5$  мБк/(м<sup>2</sup>·с) и  $C_o = 4,4$  Бк/м<sup>3</sup>. В случае увеличения толщины отделочного слоя наблюдается увеличение скорости эксхалляции радона и объемной активности радона. Эта зависимость носит линейный характер.

При  $\rho_o^M \approx \rho_o^{отд}$  наличие отделочного слоя толщиной 1 см на поверхности силикатного кирпича вызывает увеличение  $q$  с 6,0 до 9,4 мБк/(м<sup>2</sup>·с) и  $C_o$  с 10,7 до 16,7 Бк/м<sup>3</sup>.

Расположение отделочных слоев также играет существенную роль. Известно, что они могут располагаться внутри, снаружи и с двух сторон ограждающей конструкции.

Для материалов с  $\rho_o^M < \rho_o^{отд}$  в случае расположения отделочного слоя снаружи наблюдается увеличение скорости эксхалляции и объемной активности радона для золобетона (табл. 1) с 17 до 31 мБк/(м<sup>2</sup>·с) и с 30 до 32 Бк/м<sup>3</sup>, для керамзитобетона (табл. 2) с 6,6 до 7 мБк/(м<sup>2</sup>·с) и с 11,7 до 12,47 Бк/м<sup>3</sup>. В том случае, если слой це-

ментно-песчаного раствора расположен с внутренней стороны стеновой конструкции, то скорость эксхалляции радона и объемная активность радона в воздухе помещения снижается: для золобетона с 17 до 3,1 мБк/(м<sup>2</sup>·с) и С<sub>о</sub> с 30 до 5,6 Бк/м<sup>3</sup>, для керамзитобетона с 6,6 до 3 мБк/(м<sup>2</sup>·с) и С<sub>о</sub> с 11,7 до 5,4 Бк/м<sup>3</sup>.

Для строительных материалов с  $\rho_o^M > \rho_o^{омд}$  (тяжелый бетон) при расположении отделочного слоя строительного раствора снаружи происходит незначительное повышение  $q$  и С<sub>о</sub> (табл. 3). Скорость эксхалляции радона изменяется с 8,1 до 9 мБк/(м<sup>2</sup>·с) и С<sub>о</sub> с 14,5 до 15,6 Бк/м<sup>3</sup>, в то время как при расположении раствора с внутренней стороны  $q$  увеличивается с 7,9 до 16 мБк/(м<sup>2</sup>·с), а С<sub>о</sub> с 14,5 до 27,99 Бк/м<sup>3</sup>, то есть почти в два раза.

Для строительных материалов с  $\rho_o^M \approx \rho_o^{омд}$  (силикатный кирпич) внутренний слой строительного раствора толщиной 2 см увеличивает  $q$  с 5 до 9,4 мБк/(м<sup>2</sup>·с) и С<sub>о</sub> с 10,7 до 16,8 Бк/м<sup>3</sup>, в то время как наружный слой практически не меняет скорость эксхалляции радона и его объемную активность:  $q = 6$  мБк/(м<sup>2</sup>·с) и С<sub>о</sub> = 10,7 Бк/м<sup>3</sup> (табл. 4).

Двухсторонняя отделка при толщине слоя в 2 см с каждой стороны снижает  $q$  и С<sub>о</sub> для керамзитобетона с 6,6 до 3,2 мБк/(м<sup>2</sup>·с) и с 11,7 до 5,6 Бк/м<sup>3</sup>.

Для тяжелого бетона наблюдается увеличение  $q$  с 8,1 до 16,7 мБк/(м<sup>2</sup>·с) и С<sub>о</sub> с 14 до 29,8 Бк/м<sup>3</sup>, т.е. более чем в 2 раза. Для золобетона  $q$  и С<sub>о</sub> снижаются соответственно с 11,0 до 2,5 мБк/(м<sup>2</sup>·с) и с 20 до 4,6 Бк/м<sup>3</sup>, т.е. более чем в 3 раза. Для ячеистого бетона такое снижение происходит для  $q$  с 3,2 до 1,6 мБк/(м<sup>2</sup>·с) и С<sub>о</sub> с 5,7 до 2,87 Бк/м<sup>3</sup> при толщине слоя ячеистого бетона 30 см.

Сочетание различных видов материалов, например ячеистого и тяжелого бетона, показало, что увеличение толщины слоя ячеистого бетона при постоянной толщине слоя тяжелого бетона приводит к увеличению скорости эксхалляции и объемной активности радона. Дополнительный слой раствора со стороны ячеистого бетона также приводит к увеличению исследуемых характеристик. Использование на предприятиях трехслойных панелей из керамзитобетона с пенополиуретаном и двумя отделочными слоями по 2 см каждый не только обеспечивает высокие теплотехнические характеристики стеновых материалов и конструкций, но и позволяет более чем в 1,5 раза снизить скорость эксхалляции радона и его объемную активность в воздухе помещения (табл. 2). В случае сочетания керамзитобетона с ячеистым бетоном и двумя слоями строительного раствора скорость эксхалляции радона и его объемная активность уменьшается в меньшей степени по сравнению со слоем пенополиуретана:  $q$  с 3,2 до 2,6 мБк/(м<sup>2</sup>·с) и С<sub>о</sub> с 5,63 до 4,69 Бк/м<sup>3</sup>. Использование золобетона в качестве внутреннего слоя в панели из керамзитобетона малоэффективно: скорость эксхалляции и объемная активность радона, составляют соответственно 2,9 мБк/(м<sup>2</sup>·с) и 5,25 Бк/м<sup>3</sup>.

Рассмотренная модель эксхалляции и содержания радона в зависимости от вида строительных материалов, их расположения в конструкции, наличия отделочного слоя, его толщины и других, позволяют прогнозировать радиационный фон помещения и своевременно принимать меры по защите людей от радона и продуктов его распада. Моделируя различные виды строительных материалов в конструкции стены можно на стадии проектирования оценить радиационные характеристики зданий и своевременно внести коррективы для снижения скорости эксхалляции радона и его объемной активности в воздухе помещений.

Однако надо учитывать, что существуют и другие факторы, влияющие на радиационный фон помещений, которые из-за сложности задачи в данной работе не рассматривались.

**Таблица 1.** Объемная активность и скорость эксхалляции радона из стеновой конструкции (материал – золобетон)

Наименование	$q_i$ Бк/м <sup>2</sup> ·с	$C_{o1}$ Бк/м <sup>3</sup>	$C_{экв1}$ Бк/м <sup>3</sup>
1	2	3	4
$A_{Ra} = 60$ Бк/кг Однослойная конструкция	0,011	20,00	10,72
Двухслойная конструкция золобетон – 30 см цементно-песчаный раствор 2 см	0,0025	4,43	2,37
Трехслойная конструкция цементно-песчаный раствор 2 см золобетон – 30 см цементно-песчаный раствор 2 см	0,0026	4,64	2,49
$A_{Ra} = 90$ Бк/кг Однослойная конструкция	0,017	30,00	16,0
Двухслойная конструкция золобетон – 30 см внутренний слой цементно-песчаного раствора 2 см	0,0031	5,6	3,01
Двухслойная конструкция золобетон – 30 см наружный слой цементно-песчаного раствора 2 см	0,0186	32,0	17,8
Трехслойная конструкция цементно-песчаный раствор 2 см золобетон – 30 см цементно-песчаный раствор 2 см	0,0033	5,9	3,16

**Таблица 2.** Зависимость объемной активности и скорости эксхалляции радона от конструкции стены из керамзитобетона

Наименование	$q_i$ Бк/м <sup>2</sup> ·с	$C_{o1}$ Бк/м <sup>3</sup>	$C_{экв1}$ Бк/м <sup>3</sup>
1	2	3	4
Однослойная конструкция из керамзитобетона толщиной 31 см	0,0066	11,73	6,28
Двухслойная конструкция: керамзитобетон 31 см цементно-песчаный раствор 2 см	0,0030	5,39	2,89

**Продолжение таблицы 2.**

1	2	3	4
Трехслойная конструкция: цементно-песчаный раствор 2 см керамзитобетон 31 см цементно-песчаный раствор 2 см	0,0032	5,63	3,02
Пятислойная конструкция: цементно-песчаный раствор 2 см керамзитобетон 10,5 см пенополиуретан 10 см керамзитобетон 10,5 см цементно-песчаный раствор 2 см	0,0017	3,02	1,62
Пятислойная конструкция: цементно-песчаный раствор 2 см керамзитобетон 10,5 см ячеистый бетон 10 см керамзитобетон 10,5 см цементно-песчаный раствор 2 см	0,0026	4,69	2,51
Пятислойная конструкция: цементно-песчаный раствор 2 см керамзитобетон 10,5 см золобетон 10 см керамзитобетон 10,5 см цементно-песчаный раствор 2 см	0,0029	5,25	2,81

**Таблица 3.**

**Зависимость объемной активности и скорости эксхалляции радона от конструкции стены из тяжелого бетона**

Наименование	$q_{\text{экв}}$ Бк/м <sup>2</sup> ·с	$C_{\text{экв}}$ Бк/м <sup>3</sup>	$C_{\text{экв}}$ Бк/м <sup>3</sup>
Однослойная конструкция тяжелый бетон	0,0081	14,5	7,7
Двухслойная конструкция: тяжелый бетон внутренний слой цементно-песчаного раствора 2 см	0,016	27,9	14,9
Двухслойная конструкция: тяжелый бетон наружный слой цементно-песчаного раствора 2 см	0,009	15,6	8,4

Таблица 4.

Зависимость объемной активности и скорости эксхалляции радона от конструкции стены из силикатного кирпича

Наименование	$q_i$ , Бк/м <sup>2</sup> ·с	$C_0$ , Бк/м <sup>3</sup>	$C_{экв}$ , Бк/м <sup>3</sup>
Однослойная конструкция из силикатного кирпича 51 см	0,0059	10,71	5,74
Двухслойная конструкция: силикатный кирпич 51 см внутренний слой цементно-песчаного раствора 2 см	0,0094	16,77	8,95
Двухслойная конструкция: силикатный кирпич 51 см внутренний слой цементно-песчаного раствора 2 см	0,006	10,89	5,81
Трехслойная конструкция цементно-песчаный раствор 2 см силикатный кирпич 51 см цементно-песчаный раствор 2 см	0,0095	16,93	9,07

ЛИТЕРАТУРА

1. Крисюк Э.М. Основные виды облучения людей //АНРИ, 1999.- №2, с.4-9.
2. Крисюк Э.М. Радиационный фон помещений. – М.: Энергоатомиздат, 1989.-120 с.

УДК 69.001.12/18  
Соколов Б.С.

**НОВЫЙ ТИП ПАНЕЛЬНЫХ ЖИЛЫХ ДОМОВ**

В Республике Татарстан 7 заводов крупнопанельного домостроения, 3 из них находятся в г. Казани. Казанский ДСК выпускает изделия для жилых домов 121, 90, 125 серий.

Здания серий 121 и 90, авторами которых является ЦНИИЭП жилища, 9-ти этажные с несущими поперечными с шагом 3.2 и 3.6 м и продольными стенами. Плиты перекрытия плоские сплошного сечения опираются по четырем сторонам. Ширина зданий 12.8 м. Здания 125 серии, запроектированные институтом КБ им. Якушева (г. Москва), имеют поперечные несущие стены с шагом 6.4 и 3.2 м. Плиты многопустотные из предварительно напряженного железобетона. Дома возводятся на свайных фундаментах с опиранием цокольных панелей на оголовки свай. В связи с изменением требований по теплотехнике наружные стены выполняются трехслойными. Наружный и внутренний слой из тяжелого бетона. В качестве утеплителя используется пенополистирол.

Сравнивая конструктивные решения зданий перечисленных серий можно отдать предпочтение 125 серии, позволяющей при широком шаге несущих стеновых панелей выполнить лучшее объемно-планировочное решение квартир. Тем не ме-