УДК 550.504

ПЕРЕНОС РАДОНА В ПОВЕРХНОСТНОМ СЛОЕ ПОЧВЫ В УСЛОВИЯХ СВОБОДНОЙ ТЕПЛОВОЙ КОНВЕКЦИИ

Климшин А.В., Миндубаев М.Г. – Институт геофизики УрО РАН, Екатеринбург
Колотухин А.Э. – УрФУ им. Первого Президента России Б.Н. Ельцина, Екатеринбург

Аннотация. На лабораторном стенде исследовано распределение плотности потока радона по поверхности грунта в условиях свободной тепловой конвекции воздуха в пористой среде. На примере экспериментальных данных и численных расчетов показано, что при положительных градиентах температуры, соответствующих градиентам, наблюдаемым при охлаждении поверхности почвы в естественных условиях, возникает свободная тепловая конвекция, которая приводит к неоднородному распределению плотности потока радона по поверхности грунта.

Радон, плотность потока, температура, численное моделирование, свободная тепловая конвекция, пористая среда.

TRANSFER OF RADON IN THE SOIL SURFACE IN FREE THERMAL CONVECTION CONDITIONS

Klimshin A.V., Mindubaev M.G. – Institute of Geophysics, UB of RAS, Yekaterinburg
Kolotukhin A.E. – UFU named after the First President of Russia B.N. Yeltsin, Yekaterinburg

Abstract. On a laboratory stand the distribution of the flux density of radon on the soil surface under conditions of free thermal convection in a porous medium are studied. On the example of experimental data and numerical calculations it is shown that for positive temperature gradients wich observe during cooling the soil surface under natural conditions, a free thermal convection arise. It leads to a nonuniform distribution of the flux density of radon on the soil surface.

Radon, flux density, temperature, numerical simulation, free thermal convection, porous medium.

Введение

С 1999 года в России в качестве основного контролируемого параметра при оценке радоноопасности строительных площадок используется плотность потока радона (далее – ППР) с поверхности почвы (ОСПОРБ-99). На основании измеренных значений этой величины принимается решение о внесении мер защиты от радона в проект здания. За время применения этого критерия оценки накопилось большое количество экспериментальных фактов, указывающих на значительные временные вариации плотности потока радона, достигающие порядка его величины в сутки (Зайцев, Рогалис, Кузьмич, 2008; Микляев, Петрова, 2007). В работе (Климшин, 2009) показано, что суточные вариации температуры в верхнем слое почвы могут приводить к возникновению свободной тепловой конвекции почвенного воздуха. Это явление рассматривается как одна из причин возникновения вариаций плотности потока радона с поверхности почвы.

В работах (Horton, Rogers, 1945), а также (Lapwood, 1948) и (Золотарева, 1965) показано, что в слое пористой среды толщиной h при подогреве снизу может возникать конвективная фильтрация флюида, подобная той, которая возникает в сплошных средах (Гершуни, Жуховицкий, 1972).

На рис. 1 приведены зависимости, характеризующие суточные и годовые колебания температуры грунтов, характерные для Среднего Урала. Температура измерялась в суглинках, на полигоне Института геофизики в г. Екатеринбурге. Аппаратура и методика измерений описаны в работах (Климшин и др. 2010; Котлованова, 2010).

Суточные колебания температуры поверхности почвы амплитудой 9,7–10,6 ^{o}C (СНиП 23-01-99) наблюдаются на Среднем Урале с апреля по ноябрь (в отсутствии снежного покрова). Тепловая волна проникает приблизительно на 30–35 см вглубь от поверхности. В таких условиях, при охла-

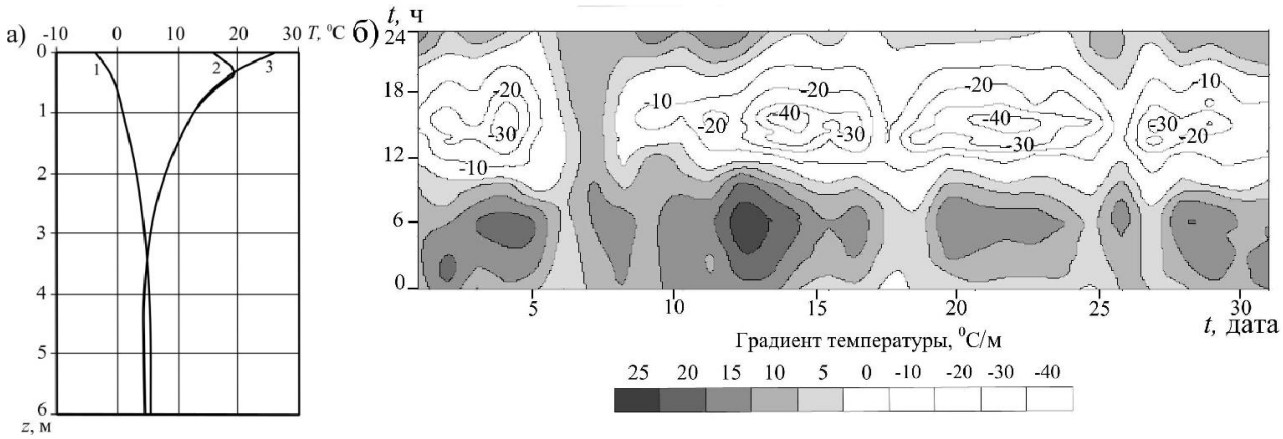

Рис. 1. Зависимости, характеризующие суточные и годовые колебания температуры грунтов, характерные для Среднего Урала: а) зависимости температуры грунтов от глубины для времен измерений: 1 – 15.02.2010 г., 15:00; 2 – 16.07.2009 г., 6:00; 3 – 16.07.2009 г., 18:00; б) зависимость градиента температуры грунтов в слое 0–0,3 м от даты и времени суток; измерения выполнены в августе 2009 г.

ждении поверхности почвы, возможно возникновение конвективного движения воздуха в поровом пространстве грунтов, проницаемость K которых более $8\cdot10^{-9}$ м^2. Положительные градиенты температуры почвы возникают преимущественно в ночное время суток (рис. 1б). При годовых колебаниях температуры положительный градиент, равный 0,7–8,7 °С/м, устанавливается в период с ноября по апрель в слое грунтов 0–4,5 м. В таких условиях возможно возникновение свободной тепловой конвекции в грунтах с проницаемостью K более 10^{-9} м^2.

В данной работе исследуется влияние свободной тепловой конвекции воздуха в грунтах на величину плотности потока радона. Цель исследования: экспериментальная проверка существования свободной тепловой конвекции на лабораторном стенде в условиях, соответствующих естественным колебаниям температуры верхнего слоя грунтов; экспериментальная оценка влияния свободной тепловой конвекции на диапазон вариаций плотности потока радона с поверхности почвы; исследование переноса радона в пористой среде в условиях свободной тепловой конвекции методом численного моделирования.

Аппаратура и методика

Экспериментальные исследования проводились в лабораторных условиях для того, чтобы исключить или ограничить влияние на плотность потока радона колебаний атмосферного давления, скорости и направления ветра, изменения влажности пористой среды, а также влияние осадков и фазовых переходов флюида. Экспериментальный стенд изображен на рис. 2. Создаваемый в лабораторной установке градиент температуры составляет около 20–30 °С/м, что соответствует градиенту, возникающему в естественных условиях при суточных колебаниях температуры грунтов.

Верхняя часть экспериментального стенда представляет собой емкость, заполненную доверху смесью из гранитного щебня фракции 5 мм и гранитного отсева фракции 1 мм. Проницаемость этого материала, определенная методом фильтрации, составляет $K = 2\cdot10^{-9}$ м^2. Боковые стенки корпуса обклеены изнутри теплоизолирующим материалом (поролон) для уменьшения горизонтального теплового потока. В нижней части стенда помещен нагревательный элемент, позволяющий поддерживать положительный градиент температуры в пористой среде. Для измерения градиента температуры в толще пористой среды размещены температурные датчики на расстоянии 30 и 450 мм от дна стенда.

Источник тепла, установленный под дном стенда, представляет собой шесть последовательно соединенных резисторов

с номинальным сопротивлением 1,8 Ом, питаемых напряжением 22 В от понижающего трансформатора УЗМ-0,4У3. Общая мощность нагревательной установки составляет ≈40 Вт.

Температура пористой среды измерялась терморегистратором Center 306. В качестве датчиков температуры были использованы термопары модели К-89 (рис. 2). Измерения плотности потока радона производились в течение двух часов методом экспонирования в контрольных точках накопительных камер с сорбентом радона, с последующим определением величины потока на измерительном комплексе «Камера-01» по величине бета-излучения дочерних продуктов распада радона, поглощенного сорбентом.

Экспериментальные данные

Экспериментальные данные измерения температуры в пористой среде сопоставлялись с теоретическими расчётами. Для этого решалась задача распространения тепла в однородной среде:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \kappa_{ef} \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}$$
$$T(z,0) = T_1,\ T(0,t) = T_2,\ T(h,t) = T_1, \qquad (1)$$

где T – температура среды, °С; T_1 – температура помещения, в котором находится стенд, °С; T_2 – температура нагревателя, °С; h – высота бочки, м; κ_{ef} – коэффициент температуропроводности среды, м^2/с.

Ось OZ направлена вверх. Ее начало совпадает с дном бочки.

Аналитическое решение задачи (1) имеет вид:

$$T(z,t) = T_1 - (T_2 - T_1)\text{x}$$
$$\text{x}\sum_{n=0}^{\infty}\left[\operatorname{erfc}\left(\frac{2h(n+1)-z}{2\sqrt{\kappa_{ef}\,t}}\right) - \operatorname{erfc}\left(\frac{z+2nh}{2\sqrt{\kappa_{ef}\,t}}\right)\right]. \qquad (2)$$

На рис. 3 представлены результаты измерений температуры пористой среды при ее подогреве снизу. Время включения подогрева стенда соответствует отметке $t = 2{,}4$ ч.

Коэффициент температуропроводности $\kappa_{ef} = 2{,}6 \cdot 10^{-7}$ (м^2/с) подобран на основе сравнения экспериментальных и теоретических значений (с использованием выражения (2)) температуры пористой среды на высоте 0,03 м в интервале времени от 2,4 до 26 ч (рис. 3, кривые 1, 1′). Процедура подбора основана на минимизации функционала, являющегося суммой квадратов невязок между экспериментальными и теоретическими значениями.

Различие теоретической и экспериментальной кривых на высоте 450 мм (кривые 2 и 2′) на рис. 3 указывает на то, что при подогреве снизу температурная волна распространяется в слое пористой среды быстрее, чем это следует из модели кондуктивного теплопереноса. Это свидетельствует о наличие дополнительного – конвективного механизма переноса тепла.

В табл. 1 приведены результаты измерений плотности потока радона при равномерном распределении температуры по слою пористой среды (то есть, в отсутствии нагревания).

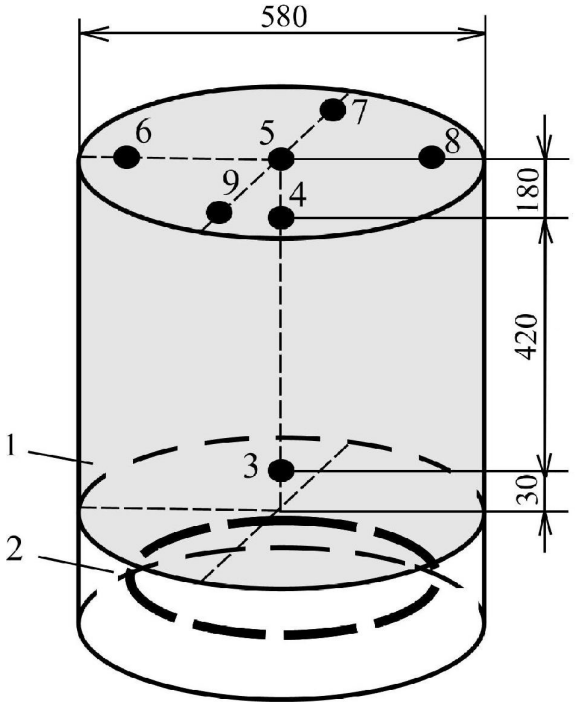

Рис. 2. Общий вид экспериментального стенда: 1 – часть стенда, заполненная щебнем и отсевом; 2 – нагревательный элемент; 3, 4 – температурные датчики; 5–9 точки измерений плотности потока радона (точки 6–9 удалены на 220 мм от точки 5)

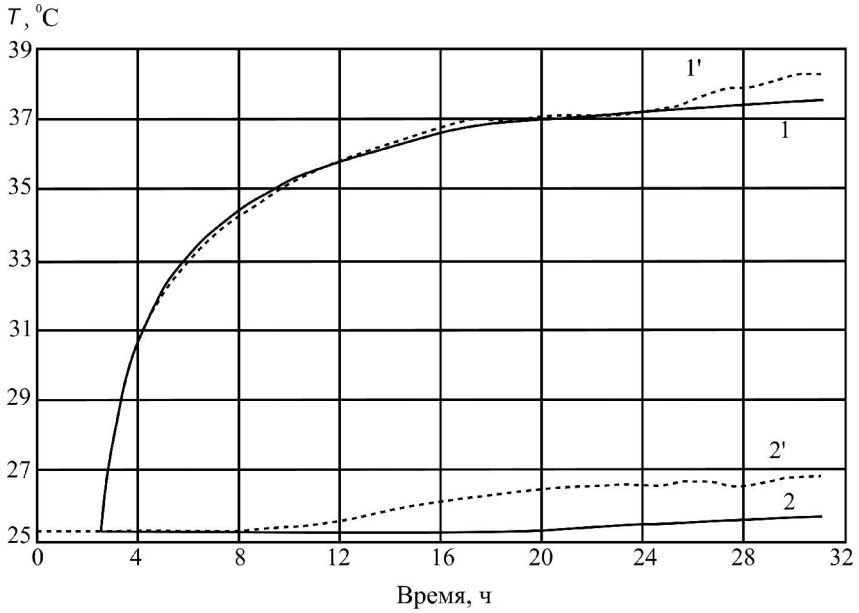

Рис. 3. Изменение температуры пористой среды (*T*) за период измерений на высоте 30 мм (кривые 1 и 1´) и 450 мм (кривые 2 и 2´) от дна стенда: сплошные линии (1 и 2) – теоретический расчет, пунктирные линии (1´ и 2´) – экспериментальные данные

Среднее значение и стандартное отклонение, определенные по результатам трех серий измерений плотности потока радона, равны 24 и 4 мБк/(м^2·с) соответственно. В табл. 2 приведены результаты измерений плотности потока радона при положительном градиенте температуры.

Среднее значение и стандартное отклонение, определенные по результатам трех серий измерений плотности потока радона, при положительном градиенте температуры пористой среды, равны 17 и 12 мБк/(м^2·с) соответственно.

Теоретическая модель

В данной работе проведено численное моделирование миграции радона в почвенном воздухе в условиях свободной конвекции, обусловленной положительным градиентом температуры. Исследования переноса радиоактивной эманации в условиях свободной тепловой конвекции флюида в пористой среде являются новыми. На начальном этапе исследований нами используется ряд существенных допущений. Рассматривается фильтрационная конвекция в пористой среде для несжимаемого флюида, описываемого приближением Буссинеска. Среда считается изотропной, зависимость коэффициента теплового расширения и вязкости газа от температуры не учитывается. Примем в качестве единицы длины – высоту бочки *H*; скорости – κ_{ef}/H; температуры – $A \cdot H$; давления – $\rho_0 \nu \kappa_{ef}/K$; объемной активности радона – C_0; где κ_{ef} – эффективный коэффициент температуропроводности среды, м^2/с; *A* – градиент температуры, ^{o}С/м; *K* – проницаемость порис-

Таблица 1. Плотность потока радона с поверхности пористой среды (в отсутствии нагревания)

Номер точки измерений (в соответствии с рис. 2)	Результаты измерений плотности потока радона, мБк/(м^2·с)				
	серия 1	серия 2	серия 3	серия 4	серия 5
5	19	25	25	23	22
6	29	26	28	30	30
7	31	17	24	26	23
8	29	25	25	17	19
9	21	24	19	25	21
Среднее значение	26	23	24	25	23
Стандартное отклонение	5	4	3	5	4

Таблица 2. Плотность потока радона с поверхности пористой среды (при положительном градиенте темпратуры)

Номер точки измерений (в соответствии с рис. 2)	Результаты измерений плотности потока радона, мБк/(м^2·с)				
	серия 1, $\partial T\partial/z$=24 °С/м	серия 2, $\partial T/\partial z$=20 °С/м	серия 3, $\partial T/\partial z$=29 °С/м	серия 4, $\partial T/\partial z$=30 °С/м	серия 5, $\partial T/\partial z$=28 °С/м
5	33	29	35	20	33
6	7	17	12	15	5
7	22	34	3	4	14
8	4	3	28	19	4
9	28	12	5	4	26
Среднее значение	19	19	17	15	16
Стандартное отклонение	13	13	14	10	13

той среды, м^2; ν – кинематическая вязкость воздуха, м^2/с; C_0 – равновесная объемная активность радона, Бк/м^3. Система стационарных безразмерных уравнений, описывающих перенос радона в условиях свободной тепловой конвекции, имеет вид (Nield, Bejan, 2006; Булашевич, Хайритдинов, 1959):

$$\mathbf{u} = -\nabla p + \mathrm{Ra}_p T 1_z, \qquad (3.1)$$

$$\mathbf{u} \cdot \nabla \mathrm{T} = \nabla^2 \mathrm{T}, \qquad (3.2)$$

$$\frac{1}{\eta}\mathbf{u}\cdot\nabla C = \frac{D}{\kappa_{ef}\eta}\nabla^2 C - \lambda^*(C-1), \qquad (3.3)$$

$$\nabla\cdot\mathbf{u} = 0, \qquad (3.4)$$

где $\mathrm{Ra}_p = \dfrac{\alpha g H^2 \mathrm{A}}{\nu\kappa_{ef}}\mathrm{K}$ – число Рэлея для пористой среды; $\lambda^* = \dfrac{\lambda H^2}{\kappa_{ef}}$ – безразмерная постоянная распада радона; $\mathbf{u} = \eta\ \mathbf{v}$ – скорость фильтрации воздуха в пористой среде; η – пористость среды; $\mathbf{v}$ – скорость частиц воздуха в порах; p – давление; T – температура; α – коэффициент теплового расширения воздуха (К$^{-1}$); g − ускорение свободного падения, м/с^2; C – объёмная активность радона; D – коэффициент диффузии радона, м^2/с.

Нами рассматривается двумерная осесимметричная модель свободной конвекции флюида в цилиндре. В такой постановке компоненты скорости фильтрации можно выразить через функцию тока ψ:

$$u_r = -\frac{1}{r}\frac{\partial\psi}{\partial z}, \quad u_z = \frac{1}{r}\frac{\partial\psi}{\partial r}. \qquad (4)$$

При принятых выражениях для компонент скорости (4), уравнение неразрывности (3.4) выполняется автоматически. Уравнения (3.1–3.3) в переменных функции тока ψ в цилиндрических координатах (r, φ, z) преобразуются к следующему виду:

$$\frac{\partial}{\partial r}\left(\frac{1}{r}\frac{\partial\psi}{\partial r}\right) + \frac{1}{r}\frac{\partial^2\psi}{\partial z^2} = \mathrm{Ra}_p\frac{\partial T}{\partial r}, \qquad (5.1)$$

$$\frac{1}{r}\left(\frac{\partial\psi}{\partial r}\frac{\partial T}{\partial z} - \frac{\partial\psi}{\partial z}\frac{\partial T}{\partial r}\right) = \nabla^2 T, \qquad (5.2)$$

$$\frac{1}{\eta}\left(\frac{1}{r}\frac{\psi}{\partial r}\frac{\partial T}{\partial z} - \frac{1}{r}\frac{\partial\psi}{\partial z}\frac{\partial T}{\partial r}\right) = \frac{D}{\kappa_{ef}\eta}\nabla^2 C - \lambda^*(C-1), \qquad (5.3)$$

где $\nabla^2 = \left(\dfrac{\partial^2}{\partial r^2} + \dfrac{1}{r}\dfrac{\partial}{\partial r} + \dfrac{\partial^2}{\partial z^2}\right)$.

Мы принимаем, что нижняя и верхняя границы слоя являются изотермическими, а на боковых границах отсутствует тепловой поток: T = 1, при z = 0; T = 0 при $z = h$; $\partial \mathrm{T}/\partial \mathrm{r} = 0$, при r = 0 и $r = R_0$, где R_0 – радиус цилиндра.

Для объёмной активности радона:
$\partial C/\partial r = 0$ при $r = R_0$; $\partial C/\partial z = 0$ при $z = 0$; $C = 0$ при $z = H$.

Для функции тока:
$\psi = 0$, при $z = 0$, $r = 0$, $r = R_0$; $\partial\psi/\partial z = 0$, при $z = 1$, т. е. верхняя граница принимается проницаемой.

Система стационарных уравнений (5), вместе с соответствующими граничными условиями, решалась методом установления по времени с использованием консервативной, монотонной неявной схемы конечных разностей (Берковский, Ноготов, 1976; Миндубаев, 2010). Применялась равномерная пространственная сетка с шагом $h = 0{,}01$.

При численном моделировании для параметров системы уравнений (5) приняты следующие значения: коэффициента диффузии радона и эффективной температуропроводности, соответственно, $D = 10^{-6}$ м^2/с и $\kappa_{ef} = 2{,}5\cdot10^{-7}$ м^2/с; безразмерного значения постоянной распада радона $\lambda^* = 3{,}33$; пористости $\eta = 0{,}5$ и проницаемости $K = 2\cdot10^{-9}$ м^2. В работах (Bau, Torrance, 1982; Nygart, Tyvand, 2010) исследуются условия возникновения конвекции в пористой среде, находящейся в цилиндре. В них на примере аналитического решения показано, что с уменьшением аспектного отношения $a = R_0/H$, устойчивость существенно возрастает. В данной работе в результате численного моделирования получена кривая нейтральной устойчивости для осесимметричной конвекции в пористой среде с верхней проницаемой границей (рис. 4). В дополнение к результатам, представленным в работе (Bau, Torrance, 1982), нами продолжена кривая нейтральной устойчи-

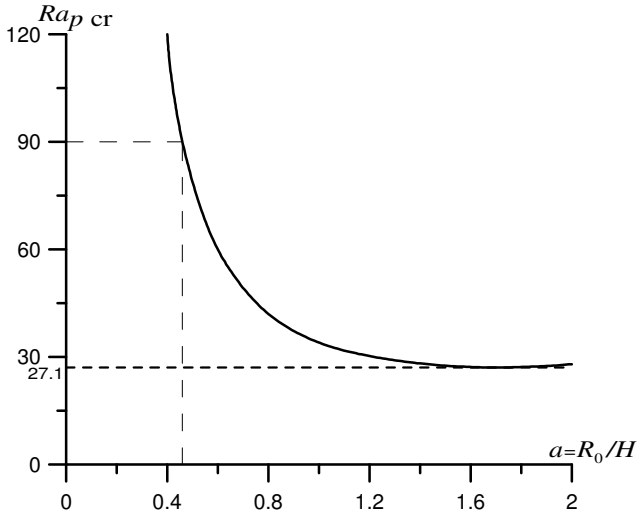

Рис. 4. Кривая нейтральной устойчивости для осесимметричной конвекции в пористой среде в цилиндре с верхней проницаемой границей (зависимость критического числа Рэлея Ra_{pcr} от аспектного отношения $a = R_0/H$)

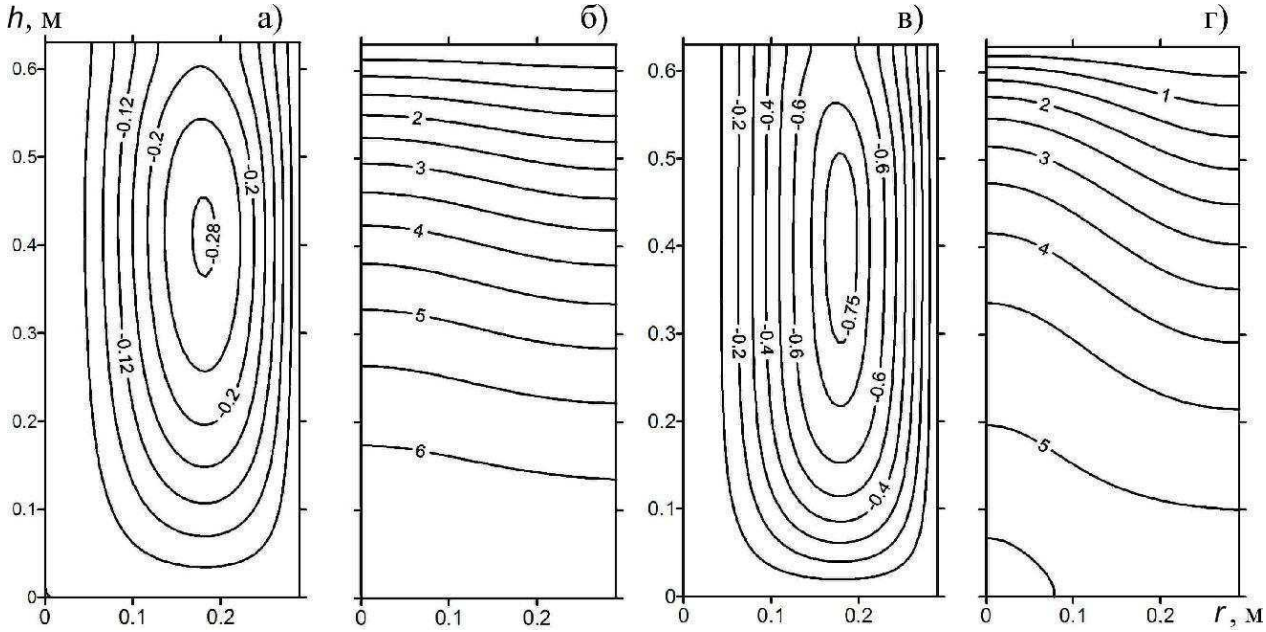

Рис. 5. Изолинии безразмерной функции тока ψ (а, в) и размерной объёмной активности радона $C\cdot10^3$ Бк/м^3 (б, г) при значениях числа Рэлея $Ra_p = 100$ (а, б) и $Ra_p = 140$ (в, г)

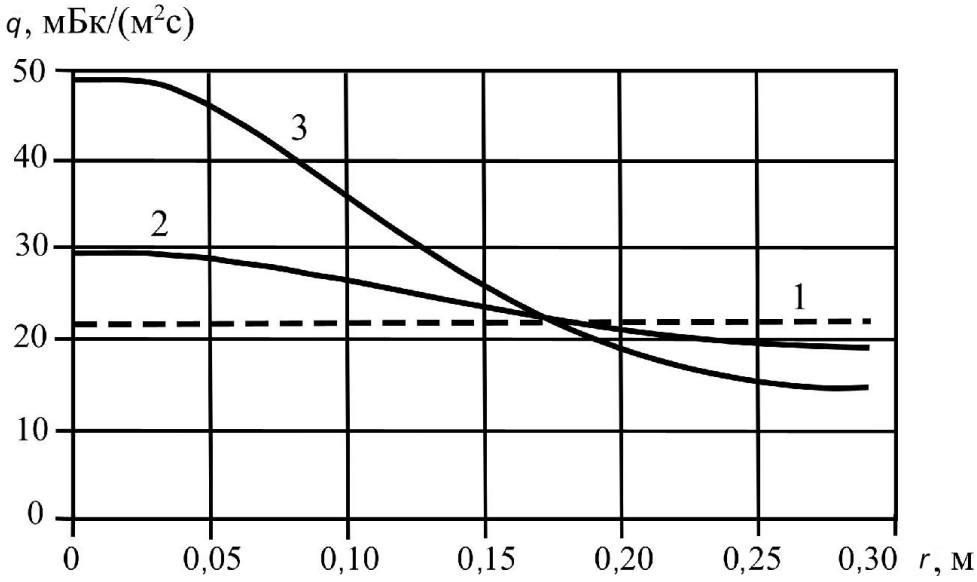

Рис. 6. Расчетные зависимости плотности потока радона с поверхности грунта q от радиуса бочки: (1) – в отсутствии конвекции (Ra_p=0); (2) – число Рэлея Ra_p = 100; (3) – число Рэлея Ra_p = 140

вости для осесимметричной моды в сторону меньших значений аспектного отношения a. Критическое число Рэлея при аспектном отношении a = 0,46, соответствующее нашей задаче, составляет $Ra_{pcr} \approx 90$, что существенно превышает критическое число для плоского бесконечного слоя пористой среды с верхней проницаемой границей Ra_{pcr} = 27,1 (Lapwood, 1948). Как следует из рис. 4, это минимальное критическое значение для случая осесимметричной конвекции достигается при аспектном отношении $a \approx 1{,}7$, что соответствует результатам, полученным в работе (Bau, Torrance, 1982).

На рис. 5 показано распределение изолиний безразмерной функции тока ψ и размерной объёмной активности радона $C{\cdot}10^3$ (Бк/м^3) при значениях числа Рэлея Ra_p = 100 и Ra_p = 140. В горизонтальном направлении показано расстояние r от оси цилиндра, а в вертикальном – высота грунта h от дна бочки, выраженные в метрах. Как следует из рисунка, с увеличением числа Рэлея Ra_p, скорость циркуляции флюида возрастает, что приводит к увеличению потока радона у оси цилиндра и уменьшению на краях. Кроме этого, с увеличением числа Рэлея Ra_p снижается интегральное значение объёмной активности радона в области.

На рис. 6 представлены плотности потока радона с поверхности грунта q при соответствующих значениях чисел Рэлея Ra_p, а также плотность потока в отсутствии конвекции, составляющая $q \approx 22$ мБк/(м^{2}с).

Рассмотренные нами примеры показывают, что при различных значениях числа Рэлея, которые зависят, главным образом, от градиента температуры и от проницаемости пористой среды, в одних и тех же точках измерения получены различные значения плотности потока радона. Этот результат качественно продемонстрирован на экспериментальных данных.

Выводы

На лабораторном стенде получены результаты измерений плотности потока радона с поверхности грунта при наличии и в отсутствии подогрева снизу. Градиенты температуры, поддерживаемые в лабораторных условиях, соответствуют градиентам, возникающим в приповерхностном слое грунтов в естественных условиях при суточных колебаниях температуры. Различие теоретической (без конвекции) и экспериментальной кривых изменения температуры пористой среды (рис. 3) и результаты измерения плотности потока радона указывают на наличие свободной тепловой конвекции воздуха в грунте.

Экспериментальными данными показано, что при возникновении свободной тепловой конвекции воздуха в грунтах может наблюдаться трехкратное увеличение стандартного отклонения значений плотности потока радона.

В данной работе впервые была решена

численным методом система уравнений, описывающих перенос радона в почвенном воздухе в условиях свободной тепловой конвекции. В результате численного моделирования, на примере двумерной осесимметричной модели, показано, что наличие свободной тепловой конвекции приводит к возникновению неоднородного по площади распределения плотности потока радона с поверхности грунта.

На основании выполненных оценок, авторы работы не рекомендуют проводить измерения плотности потока радона при оценке радоноопасности строительных площадок в ночное и утреннее время суток, а также в осеннее время года на грунтах, проницаемость которых более 10^{-9} м^2. Выводы данной работы необходимо использовать при обработке результатов измерений плотности потока радона, выполненных в условиях охлаждения поверхности почвы.

Работа выполнена при поддержке ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России на 2009–2013 годы» (ГК № П1271), Программы № 16 Президиума РАН и программы № 6 ОНЗ РАН.

Авторы благодарят профессора Ю.В. Хачая за внимание к работе и обсуждение полученных результатов.

Литература

Берковский Б.Н., Ноготов Е.Ф. Разностные схемы исследования задач теплообмена. Минск: Наука и техника, 1976. 142 с.

Булашевич Ю. П., Хайритдинов Р. К. К теории диффузии эманации в пористых средах // Известия академии наук СССР, сер. геофиз. 1959. № 12. С. 1787–1792.

Гершуни Г. З., Жуховицкий Е. М. Конвективная устойчивость несжимаемой жидкости, М.: Недра, 1972. 392 с.

Зайцев В.В., Рогалис В.С., Кузьмич С.Г. Исследования влияния временных условий на потоки радона на строительных площадках // АНРИ. 2008. № 2. С. 34–36.

Золотарев П.П. Условия возникновения тепловой конвекции в пористом пласте // Инж. журнал. 1965. Т. 5. № 2, 236–238.

Климшин А.В. Оценка вариаций плотности потока радона при возникновении свободной тепловой конвекции в верхнем слое почвы // Уральский геофизический вестник. 2009. № 2. С. 42–45.

Климшин А. В., Козлова И. А., Рыбаков Е. Н., Луковской М. Ю. Влияние промерзания поверхностного слоя грунтов на перенос радона // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2010. № 2. Вып. 16. С. 231–237.

Котлованова А.А. Исследование процессов теплопереноса в почве и горных породах по данным геотермического мониторинга // XI Уральская молодежная научная школа по геофизике. Сборник докладов. Екатеринбург: ИГФ УрО РАН, 2010. С. 126–128.

Микляев П. С., Петрова Т. Б. Механизмы формирования потока радона с поверхности почв и подходы к оценке радоноопасности селитебных территорий // АНРИ. 2007. № 2. С. 2–16.

Миндубаев М.Г. Особенности развития двумерной конвекции во вращающейся сжимаемой проводящей жидкости // Геомагнетизм и аэрономия. 2010. Т. 50. № 6. С. 792–798.

Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности (ОСПОРБ-99): 2.6.1. Ионизирующее излучение, радиационная безопасность СП 2.6.1.799-99 М.: Минздрав России, 2000. 98 с. СНиП 23-01-99. Строительная климатология // М.: ГУП ЦППС, 2004. 70 с.

Bau H.H., Torrance K.E. Low Rayleigh number thermal convection in a vertical cylinder filled with porous materials and heated from below // ASME Journ. Heat Transfer. 1982. V. 104. P. 166–172.

Horton C.W., Rogers F.T. Convection currents in a porous medium // J. Appl. Phys. 1945. 16. 367.

Lapwood E. R. Convection of a fluid in a porous medium // Proc. Camb. Phil. Soc. 1948. 44. № 4. P. 508–521.

Nield, D.A., Bejan, A. Convection in Porous Media, 3rd edn. Springer, New York. 2006.

Nygart H.S., Tyvand P.A. Onset of thermal convection in a vertical porous cylinder with a partly conducting and penetrative cylinder wall // Transport porous media. 2010. DOI 10.1007/s11242-010-9618-4.