

ОЦЕНКА ВАРИАЦИЙ ПЛОТНОСТИ ПОТОКА РАДОНА ПРИ ВОЗНИКНОВЕНИИ СВОБОДНОЙ ТЕПЛОВОЙ КОНВЕКЦИИ В ВЕРХНЕМ СЛОЕ ПОЧВЫ

Климшин А.В. – Институт геофизики УрО РАН, Екатеринбург

Аннотация. 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 площадных вариаций плотности потока радона с поверхности почвы. Даются оценки скоростей конвективных потоков воздуха и связанных с ними вариаций плотности потока радона.

Радон, конвекция, пористая среда, математическое моделирование.

ESTIMATION OF VARIATIONS OF RADON FLUX FROM GROUND AT OCCURRENCE FREE THERMAL CONVECTION IN THE TOP LAYER OF EARTH

Klimshin A.V. – Institute of Geophysics UB of RAS, Yekaterinburg

Abstract. It is shown that daily variations of temperature in the top layer of earth can lead to occurrence convection in a porous media. This phenomenon is considered as one of the reasons leading to occurrence of the variations of radon flux from ground. Estimations of fluid's velocity and radon flux rate are given.

Radon, convection, porous media, mathematical modelling.

Введение

С 1999 года в России в качестве основного контролируемого параметра при оценке радоноопасности строительных площадок используется плотность потока радона с поверхности почвы (СП 2.6.1.799-99). 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 самой его величины в сутки (Микляев, Петрова, 2007). Различные авторы связывают эти вариации с чувствительностью измеряемой величины к изменениям давления и температуры воздуха, к приливным движениям земной коры, к колебаниям уровня грунтовых вод, к изменению влажности почвы (Зайцев, Рогалис, Кузьмич, 2008; Микляев, Петрова, 2007). Как правило, эти гипотезы не сопровождаются теоретическим обоснованием.

Целью данной работы является объяснение механизма возникновения вариаций плотности потока радона с поверхности почвы, вызванных суточными колебаниями температуры.

В рамках поставленной цели рассматриваются следующие основные задачи:

- оценка условий возникновения свободной тепловой конвекции почвенного воздуха в приповерхностном слое при суточных вариациях температуры,
- оценка величины скорости конвективного движения почвенного воздуха,
- оценка влияния свободной тепловой конвекции воздуха на величину плотности потока радона с поверхности почвы,
- анализ ошибок, возникающих при оценке радоноопасности стройплощадок по плотности потока радона, при возникновении свободной тепловой конвекции в приповерхностном слое почвы.

Постановка задачи и анализ результатов

По данным (СНиП 23-01-99) суточные вариации температуры поверхности почвы (для Среднего Урала) составляют 9,7-10,6 °С. Тепловая волна проникает приблизительно на 30 см вглубь от поверхности, создавая вертикальный градиент температуры, равный 15-30 °С/м. В таких условиях при охлаждении поверхности почвы возможно возникновение конвективного движения воздуха в пористом пространстве.

Конвективное движение флюида будем рассматривать в слое, ограниченном сверху поверхностью почвы ($z=0$), а снизу

Таблица 1. Значения постоянных величин, характерные для коры выветривания гранитов

Физическая величина	Обозначение	Единица измерения	Характерное значение
Ускорение свободного падения	g	м/с ²	9,8
Эффективный коэффициент температуропроводности среды	κ	м ² /с	10 ⁻⁶
Объемный коэффициент теплового расширения воздуха	β	1/К	3,67·10 ⁻³
Коэффициент проницаемости почвы	K	м ²	10 ⁻⁶ ÷ 10 ⁻¹⁰
Кинематическая вязкость воздуха	ν	м ² /с	1,51·10 ⁻⁵
Пористость почвы	ε	-	0,2
Диффузионная длина радона в почве	l	м	0,95
Равновесная объемная активность радона в почвенном воздухе	C ₀	Бк/м ³	10 ⁵
Коэффициент диффузии радона	D	м ² /с	1,9·10 ⁶
Вариации температуры поверхности почвы относительно среднесуточного значения	T _{max}	К	5
Глубина прохождения суточных вариаций температуры	h	м	0,3

– глубиной проникновения суточных вариаций температуры ($z=h$). Обозначим v – скорость движения флюида (м/с), p – отклонение давления от его значения при равновесии (Па), T – отклонение температуры от равновесного значения (К), ρ – плотность воздуха (г/м³). Обозначения и единицы измерения постоянных величин для справки приведены в табл. 1 (Аронин, 1962; Булашевич, 1975; Енохович, 1976).

В приближении Буссинеска, уравнения для описания свободной конвекции в пористой среде имеют следующий вид (Гершуни, Жуховицкий, 1972):

$$\operatorname{div} \mathbf{v} = 0, \quad (1)$$

$$\frac{1}{\varepsilon} \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} = -\frac{1}{\rho} \nabla p - \frac{\nu}{K} \mathbf{v} + g \beta T \mathbf{1}_z, \quad (2)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + (\mathbf{v} \cdot \nabla) T = \kappa \Delta T. \quad (3)$$

Здесь $\mathbf{1}_z$ – единичный вектор, направленный по вертикали вверх.

В работе (Larwood, 1948) с использованием (1)-(3) изучена конвекция в слое

пористой среды со следующими граничными условиями: $\frac{\partial v_z}{\partial z} = 0$, $z=0$; $T=0$, $z=h$; $T=0$, $v_z=0$.

$$z=h: T=0, v_z=0. \quad (5)$$

Показано, что в слое пористой среды толщиной h с разностью температур (на верхней и нижней границах слоя) T_{\max} может возникать свободная тепловая конвекция, если поровое число Релея

$$Ra = \frac{\beta g h T_{\max}}{\nu \kappa} K$$

превосходит критическое значение равное $Ra=27$. Подставив постоянные из табл 1, получим условие возникновения свободной тепловой конвекции в верхнем слое почвы при суточных вариациях температуры $K=8 \cdot 10^{-9}$ (м²).

На рис. 1 показана форма течения флюида в двумерном виде (Larwood, 1948).

Сравнивая по порядку величины члены уравнения (2), находим максимальную скорость движения флюида:

$$V_{\max} \approx \frac{g \beta T_{\max}}{\nu} K \approx 1,2 \cdot 10^4 \text{ К}.$$

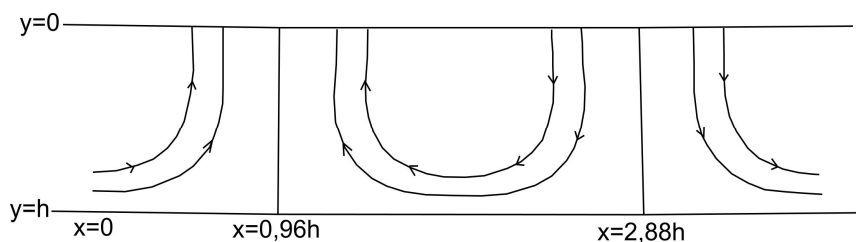


Рис. 1. Линии тока, полученные Лэпвудом при решении задачи (1)-(5)

В частности, при значении проницаемости почвы $K=8 \cdot 10^{-9} \text{ (м}^2\text{)}$, соответствующем критическому числу Релея, максимальная скорость конвекции будет равна $9,6 \cdot 10^{-5} \text{ (м/с)}$ (приблизительно 40 см в час). Разность давлений теплого восходящего и охлажденного нисходящего потоков почвенного воздуха можно выразить через градиент температуры:

$$P_{\max} \approx \rho g h \beta T_{\max} \approx 70 \text{ (Па)}.$$

При суточных вариациях температуры, характерным временем процесса будет время охлаждения поверхности почвы $\tau \approx (1/2 \text{ сут})$.

В этом случае, уравнение (2) можно считать квазистационарным, так как при этом

$$\frac{V_{\max}}{\epsilon \tau} \approx \frac{P_{\max}}{\rho h} \approx \frac{\rho V_{\max}}{K} \approx g \beta T_{\max}$$

Это означает, что при малом изменении граничных условий почти мгновенно возникает новый режим движения воздуха. Нестационарность процесса следует учитывать в уравнении теплопроводности (3), так как

$$\frac{1}{\tau} \approx \frac{\kappa}{h^2} \approx \frac{V_{\max}}{h}.$$

Это означает, что от граничных условий зависит глубина прохождения температурной волны, и размер конвективной ячейки. Например, во время осеннего похолодания, увеличение глубины проникновения положительного градиента температур может сопровождаться увеличением размеров конвективных ячеек.

Величина плотности потока радона с поверхности почвы \mathbf{j} складывается из двух составляющих:

$$\mathbf{j} = \mathbf{j}_{\text{диф}} + \mathbf{j}_{\text{конв}}, \quad (6)$$

где $\mathbf{j}_{\text{диф}}$ – плотность диффузионного потока радона с поверхности почвы, (мБк/м²с), равная по величине (в предположении об

экспоненциальном распределении радона в почвенном воздухе:

$$C(z) \approx C_0 (1 - e^{-\frac{z}{l}}) \text{ (Булашевич, 1975)}$$

$$j_{\text{диф}} = D \left. \frac{\partial C(z)}{\partial z} \right|_{z=0} \approx \frac{DC_0}{l}, \quad (7)$$

$\mathbf{j}_{\text{конв}}$ – конвективная составляющая плотности потока радона с поверхности почвы, (мБк/м²с), равная по величине

$$j_{\text{конв}} = C' \cdot V. \quad (8)$$

Здесь C' – объемная активность радона в приземной части атмосферы, равная приблизительно 10 Бк/м³.

При значениях постоянных, характерных для коры выветривания гранитов (табл. 1), значение диффузионной составляющей плотности потока радона равно $j_{\text{диф}} \approx 20 \text{ мБк/м}^2\text{с}$. Значение конвективной составляющей плотности потока радона с поверхности почвы в зависимости от проницаемости грунтов может составлять от 1 мБк/м²с (при $K=10^{-8} \text{ м}^2$) до 100 мБк/м²с (при $K=10^{-6} \text{ м}^2$). Таким образом, возможны следующие варианты:

- 1) при низких значениях проницаемости грунтов $K < 8 \cdot 10^{-9} \text{ м}^2$ свободная тепловая конвекция не возникает. Перенос радона осуществляется за счет диффузии;
- 2) при значениях проницаемости $K > 8 \cdot 10^{-9} \text{ м}^2$ охлаждение поверхности почвы приводит к возникновению свободной тепловой конвекции. Как видно из рис. 1 конвективные потоки направлены перпендикулярно к поверхности почвы, что способствует неравномерному по площади распределению плотности потока радона.

Выводы

В верхнем слое почвы мощностью до 30 см, подверженном суточным вариациям температуры, при охлаждении поверхности может возникать свободная тепловая конвекция, если проницаемость почвы

$K < 8 \cdot 10^{-9} \text{ м}^2$. Возникающий при этом конвективный поток радона сопоставим по порядку величины с диффузионным, а для высокопроницаемых почв ($K \gg 10^{-7} \text{ м}^2$) – превышает диффузионный. Результирующий поток радона равен сумме конвективной и диффузионной составляющих. Так как направление конвективного потока случайно распределено по поверхности почвы, то при возникновении конвекции величина результирующего потока будет отличаться от величины диффузного потока. В период охлаждения поверхности почвы, что обычно происходит ночью или при наступлении похолодания, возникает неоднородное по поверхности распределение плотности потока радона. Результаты измерений, выполненных в этот период не могут считаться достоверной оценкой радоноопасности.

На основании выполненных оценок автор работы не рекомендует проводить измерения плотности потока радона в ночное и утреннее время суток, а также – в осеннее время года. Данные оценки нуждаются в экспериментальной проверке, а также в теоретических исследованиях с использованием численного моделирования.

Работа выполнена при частичной поддержке Программы №16 Президиума РАН и программы №6 ОНЗ РАН.

Литература

- Аронин Г. С. Практическая аэродинамика. М.: Воениздат, 1962. 384с.
- Булашевич Ю. П. Некоторые нестационарные задачи диффузии частиц с ограниченным временем жизни // Ядерно-геофизические исследования. Сб. статей. Свердловск: УНЦ АН СССР, 1975. 132с.
- Гершуни Г. З., Жуховицкий Е. М. Конвективная устойчивость несжимаемой жидкости. М.: Недра, 1972. 392с.
- Енохович А. С. Краткий справочник по физике. М.: Высшая школа, 1976. 288с.
- Зайцев В.В., Роголис В.С., Кузьмич С.Г. Исследования влияния временных условий на потоки радона на строительных площадках // АНРИ 2008. №2. С. 34-36.
- 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.
- СНиП 23-01-99. Строительная климатология. ГУП ЦППС, 2004. 70с.
- СП 2.6.1.799-99 «Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности (ОСПОРБ-99). М.: Минздрав России, 2000. 98с.
- Lapwood E. R. Convection of a fluid in a porous medium // Proc. Camb. Phil. Soc. 1948. V. 44. №4. P. 508-521.