Записки Ленинградского ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции
и ордена Трудового Красного Знамени горного института им.Г.В.Плеханова,
1987, т. 111

УДК 550.83

ГИДРОДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ КОНВЕКЦИИ РАДОНА

ЛЯН-СИН-ЧЖУН

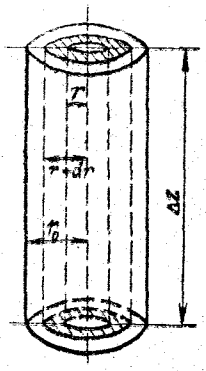
Вопрос о механизме переноса радона в горных породах и связанный с ним вопрос о глубинности эманационных экспозиционных методов не решен полностью. В ряде работ приведены расчетные формулы распределения радона за счет диффузии и конвекции [I], но, к сожалению, авторы не приводят обоснованных данных о сущности и скорости конвективного переноса эманации. В настоящей работе обсуждается проблема переноса радона с точки зрения гидродинамики.

В гидродинамике часто используется предположение Буссинеска, которое заключается в том, что изменение температуры приводит к изменению плотности жидкости (в том числе и газа) и влияет на течение жидкости. По этому предположению воздух с радоном также можно считать жидкостью Буссинеска.

Радон, образующийся в результате эманирования пород и руд, попадает в воздух или воду, заполняющие поры горной породы. За счет локальных термических аномалий, формирующихся за счет радиоактивного распада U, окисления сульфидов в руде и ряда других причин, возникает аномальный геотермический градиент. Жидкость, нагретая сильнее, имеет меньшую плотность, поэтому под действием сил архимедовой, тяжести и вязкостной, она перемещается относительно менее нагретой жидкости противоположно направлению силы тяжести. Так, радон вместе с жидкостью в жидкой и газовой фазах может перемещаться от эманирующего источника к дневной поверхности [I]. С точки зрения сохранения энергии говорят, что более теплая и легкая жидкость поднимается, а более тяжелая и холодная жидкость падает, освобождая потенциальную энергию.

В породах существуют разные группы пор. По мере движения структур и выветривания пород в породах появляются тектоклазы и более крупные макроскопические поры. В.Л.Шашкин [3] считает, что поры с радиусом r_0 порядка 10^{-3} см не являются капиллярами, так как движение жидкости в них происходит под влиянием силы тяжести. Те поры, которые имеют выход во внешнюю среду и радиус более 10^{-3} см, являются трубами конвекции жидкости с радоном.

Предположим, что в покрывающей горной породе в направлении, противоположном силе тяжести, расположена макроскопическая пора длиной Δx и радиусом r_0 (см. рисунок). Выделим бобину высотой Δx с внутренним радиусом r и внешним радиусом $r+dr$ в указанном цилиндре. Изучим закон движения этой бобины воздуха.



Расчетная схема

В процессе движения бобины воздуха суммарная вязкостная сила, действующая на бобину, направленная книзу, имеет вид

$$dF=(2\pi\mu\Delta z)\,d\left(r\frac{dv}{dr}\right),$$

где μ – коэффициент вязкости жидкости; v – скорость конвекции жидкости.

Архимедова сила, действующая на бобину,

$$(2\pi r dr\Delta z)g\rho_0,$$

где ρ_0 – плотность жидкости до нагрева; g – ускорение свободного падения.

Сила тяжести, действующая на бобину

$$(2\pi r dr\Delta z)g\rho,$$

где ρ – плотность жидкости после нагрева.

Зависимость между ρ и ρ_0 выражают следующим образом:

$$\rho=\rho_0\left[1-\alpha(T-T_0)\right],$$

где α – коэффициент расширения жидкости; T_0 и T – температура при плотности жидкости, равной ρ_0 и ρ.

При постоянном течении жидкости или газа предыдущие три силы сохраняют равновесие:

$$\mu d\left(r\frac{dv}{dr}\right)-rg\rho dr+rg\rho_0 dr=0,$$

Уравнение решается при граничном условии: $r=r_0$, $v=0$, $r=0$, $v=v_{max}(dv/dr=0)$. Тогда

$$v=\frac{g(\rho_0-\rho)}{4\mu}\left(r_0^2-r^2\right);\quad \bar{v}=\frac{1}{r_0}\int_0^{r_0} v\,dr=\frac{g(\rho_0-\rho)}{6\mu}r_0^2.$$

Обозначив геотермический градиент $\nu=(T-T_0)/z$, (здесь z – глубина от дневной поверхности), получим

$$v=\frac{g\alpha\nu\rho_0 z}{4\mu}\left(r_0^2-r^2\right); \qquad (1)$$

$$\bar{v}=\frac{g\alpha\nu\rho_0 z}{6\mu}r_0^2=\frac{2}{3}v_{max}; \qquad (2)$$

$$v_{max}=\frac{g\alpha\nu\rho_0 z}{4\mu}r_0^2. \qquad (3)$$

Разные жидкости имеют разные коэффициенты вязкости. Зависимость коэффициента вязкости воздуха от температуры T имеет вид $\mu=\mu_0(T/T_0)^{0,79}$ (где μ_0 – коэффициент вязкости воздуха при T_0, $\mu_0=1{,}792\cdot10^{-2}$ Па·с при $T_0=273$ К. Видно, что коэффициент вязкости воздуха повышается слабо с увеличением температуры. Но коэффициент вязкости воды уменьшается с повышением температуры:

T, К	273	293	313	333	353	373
μ, 10^{-2} Па·с	1,792	1,005	0,656	0,469	0,357	0,284

Коэффициенты расширения воздуха и воды равны соответственно $1/273{,}15$ и $0{,}207 \cdot 10^{-3}$ K^{-1} при $T = 293$ K.

Формулы (I)-(3) показывают, что более высокий геотермический градиент γ и радиус поры r_0 благоприятствуют конвекции жидкости с радоном от источника к поверхности Земли, потому что геотермический градиент γ растет быстрее, чем μ с повышением температуры T. Вместе с тем видно, что скорость конвекции не постоянна, она больше в месте, где температура больше.

В табл.I и 2 приведены результаты расчетов скоростей конвекций при разных значениях температурного градиента и радиуса пор.

Таблица 1

Средняя скорость конвекции воздуха с радоном, см/сут.

Глубина, м	Геотермический градиент, К/100 м	
	3	6
20	5,59/11,18	22,38/44,76
40	11,18/22,36	44,76/89,52
60	16,78/33,56	67,13/134,26
80	22,37/44,74	89,51/179,02
100	27,97/55,94	111,89/223,78

Примечание. В числителе – для $r_0 = 5 \cdot 10^{-3}$ см, в знаменателе – для $r_0 = 10^{-2}$ см.

Таблица 2

Средняя скорость конвекции воды с радоном, см/сут

Глубина, м	Геотермический градиент, К/100 м	
	3	6
20	4,36/8,76	17,44/34,88
40	8,86/17,72	35,44/70,88
60	13,30/27,00	54,00/108,00
80	18,26/36,52	73,04/146,08
100	23,20/46,40	92,80/185,60

Примечание. См. примечание в табл.1.

Из-за того, что скорость конвекции v зависит от глубины [см. равенство (I)], дифференциальное уравнение распределения радона не получает простого аналитического решения. Однако, используя расчетные формулы, можно приближенно оценить глубинность эманационного метода [I,2]. Расстоя-

ние x от источника, на котором эманационная аномалия затухает в 100 (в числителе) и 1000 (в знаменателе) раз, при кажущемся коэффициенте диффузии $D^* = 5 \cdot 10^{-3}$ см^2/с зависит от скорости конвекции v следующим образом:

v, см/сут	0	10	30	50	100	150	200
x, см	2,24 / 3,36	3,35 / 5,02	8,22 / 12,33	13,09 / 19,64	25,54 / 38,24	38,20 / 57,30	50,40 / 76,10

Итак, для глубин залегания эманирующего источника не более 20-40 м даже в благоприятных условиях ($\gamma = 6$ К/100 м, $N/N_0 = 0{,}01$, $r_0 = 5 \cdot 10^{-3}$ см) эманационный метод работает до глубины около 10-15 м.

ЛИТЕРАТУРА

1. Новиков Г.Ф., Габитов Р.М., Полещук А.Л. Трековая съемка как новая разновидность эманационной атмогеохимической съемки. – Геохимические методы поисков рудных месторождений. Новосибирск, Наука, 1982, с. 139-147.

2. Титов В.К., Венков В.А., Авдеева Т.Л., Кувшинникова Е.И. Экспозиционные эманационные методы поисков месторождений полезных ископаемых. Л., Недра, 1985, 132 с.

3. Шашкин В.Л., Пруткина М.И. Эманирование радиоактивных руд и минералов. М., Атомиздат, 1979. 110 с.