

- повітряного басейнів. Утилізація відходів»: зб. наук. Праць XXI Міжнар. наук.-практ. конф. – Харків, 2013. – Т. 1. – С. 309-322.
4. Гродзинський, М.Д. Стійкість геосистем до антропогенних навантажень. [Текст] / М.Д. Гродзинський – К.: Лікей, 1995. – 470 с.
  5. Васенко, О. Г. Концепція екологічного нормування [Текст] / О.Г. Васенко, Г.А. Верніченко А.В. Грищенко [та ін.] // Мінекобезпеки – Київ, 1997 – 18с.
  6. Поддашкін, О. В. Комплексна оцінка якісного стану ґрунтів Харківської області [Текст] / О. В. Поддашкін, О. В. Рибалова // Екологія і здоров'я людини, охорона водного і повітряного басейнів, утилізація відходів : зб. наук. праць XV Міжнар. наук.-практ. конф. – Харків, 2007. – Т. 1. – С. 309-322.
  7. Методичні рекомендації МР 2.2.12-142-2007. Оцінка ризику для здоров'я населення від забруднення атмосферного повітря. Затв. Наказом МОЗ України від 13.04.07 № 184. Київ, 2007 - 40 с
  8. Integrated Risk Information System (IRIS): [Електронний ресурс] / U.S. Environmental Protection Agency (EPA). – Режим доступу: <http://www.epa.gov/iris>.
  9. Коваленко, Г. Д. Екологічний ризик погіршення стану навколишнього природного середовища України при збереженні існуючих тенденцій антропогенного навантаження [Текст] / Г. Д. Коваленко, Г. В. Півень, О. В. Рибалова // Екологічна безпека: проблеми і шляхи вирішення : V міжнар. наук.-практ. конф., 7-10 жовт, 2009 р. : зб. наук. ст. – Х. : Райдер, 2009. – С. 52 – 56.
  10. Закон України «Про охорону атмосферного повітря» - Режим доступу : <http://zakon4.rada.gov.ua/laws/show/2707-12>
  11. Водний кодекс України. - Режим доступу: <http://zakon4.rada.gov.ua/laws/show/213/95-%D0%B2%D1%80>
  12. Державні санітарні правила планування та забудови населених пунктів № 173-96. Затверджений наказом МОЗ від 19 червня 1996 року №176. Київ, 1996 – 40 с.

УДК 614.73 (035.3)

*Основною метою дослідження є розробка сучасної технології екологічних радонових моніторинрів з використанням вбудованих еталонних джерел радону-222 з метрологічними характеристиками не залежними від параметрів навколишнього середовища – температури, атмосферного тиску, відносної вологості повітря і радіаційного фону*

*Ключові слова: екологічний моніторинг, еталонне джерело радону-222, метрологічні характеристики, незалежні від параметрів навколишнього середовища*

*Основной целью исследования является разработка современной технологии экологических радоновых мониторингов с использованием встроенных эталонных источников радона-222 с метрологическими характеристиками, не зависящими от параметров окружающей среды - температуры, атмосферного давления, относительной влажности воздуха и радиационного фона*

*Ключевые слова: экологический мониторинг, эталонный источник радона-222, метрологические характеристики, независимые от параметров окружающей среды*

# ЭТАЛОННЫЙ ИСТОЧНИК РАДОНА-222 ДЛЯ СОВРЕМЕННОЙ ТЕХНОЛОГИИ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ МОНИТОРИНГОВ В ХРАНИЛИЩАХ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ

**Л. Н. Солодовникова**  
Заместитель заведующего отделом экологии\*  
E-mail: marinaoot@isc.kharkov.com

**В. А. Тарасов**  
Доктор физико-математических наук, заведующий отделом  
Отдел сцинтилляционной радиометрии\*

E-mail: tarasov@isc.kharkov.com  
\*ГНАУ НТК «Институт монокристаллов» НАН  
Украины  
пр. Ленина, 60, г. Харьков, Украина, 61001

## 1. Введение

Настоящая статья относится к современным технологиям экологических мониторингов в хранилищах РАО, которые выделяют радон-222 в приземный слой атмосферы [1].

Современная технология экологических мониторингов радона-222, предложенная в настоящей статье, отличается от известных технологий [2-4] включением в состав стационарных постов или передвижных лабораторий измерения объёмной активности радона-222 и других характеристик окружающей среды, встроенных эталонных источников радона-222, обеспечивающих оптимальные условия эманирования радона-222 и связана с государственной программой создания эталонной базы Украины [5].

## 2. Постановка проблемы

В работах [6, 7] мониторингом называют систему наблюдений, позволяющую выделить измерения состояния биосферы под влиянием человеческой деятельности и включить элементы активных корректирующих действий при необходимости.

Следовательно, для выделения измерений объёмной активности радона-222 в хранилищах РАО необходимо иметь посты наблюдений со стабильными и периодически контролируруемыми метрологическими характеристиками.

Для контроля метрологических характеристик средств измерений объёмной активности радона-222 необходимы эталоны объёмной активности радона-222 [8] или эталонные источники радона-222 [9], встраиваемые в средства измерений радона-222.

Проблемой достоверности результатов радонового мониторинга в этой технологии являются метрологические характеристики эталонного источника радона-222, которые должны быть стабильными при изменении внешних воздействующих факторов - температуры, влажности, давления и радиационных полей.

## 3. Основная часть

### 3.1. Анализ литературных источников по теме исследования

В работах [2-4,10] рассмотрены системы и приборы для радонового мониторинга, выполненные по классической схеме без встроенного контроля метрологических характеристик.

В работе [11] выполнен обзор работ по созданию источников радона-222 в высокоразвитых странах (США, Великобритании, Германии) при создании национальных эталонов объёмной активности радона-222, а соавтором настоящей статьи предложен источник радона-222 [11] на основе стандартных образцов урановых руд УР-47С, УР-114С, УР-240С и УР-768С.

В работах [12-14] описаны лабораторные источники радона-222 на основе гранитного порошка [12], замороженного радона-222 [13] и таблеток с радием-226 хорошо растворимых в воде и нефти [14].

Таким образом, в литературе отсутствуют сведения об источнике радона-222 с метрологическими характе-

ристиками, не зависящими от параметров приземного слоя атмосферы - температуры, влажности, давления и радиационного фона.

Анализ классических работ [15-16] по исследованию эманирования уранита при воздействии температуры, атмосферного давления и влажности воздуха показал [15], что при изменении температуры от 20 до 200°C количество выделенного радона увеличилось на 10%; при изменении давления от 760 до 1мм рт.ст. количество выделенного радона уменьшилось на 4% и при вымывании радона воздухом, прошедшим через воду, количество выделенного радона увеличивалось на 47%. В работе [16] исследована динамика выделения накопленного радона при нагревании горной породы в диапазоне от 20 до 260°C в интервале скоростей от 0,25 до 2,0 град/мин. Автором [16] установлено образование конвективного процесса выделения радона при больших скоростях нагрева урансодержащих образцов горной породы и диффузионного процесса выделения радона при стационарном нагреве урансодержащих образцов горной породы.

Из работ [15-16] следует, что эталонный источник радона должен иметь систему поддержания стабильной температуры и влажности твёрдого урансодержащего материала, эманирующего радон-222.

### 3.2 Результаты исследований

Результаты эксплуатации созданных автором настоящей статьи эталонных генераторов радона-222 [8-9, 11] показали, что доминирующим фактором воздействия на эталонный генератор радона-222 является температура внешней среды.

Эталонные генераторы [8-9,11], разработанные на стандартном образце урановой руды УР-768С. В результате распада материнского ядра  $^{238}\text{U} \rightarrow ^{226}\text{Ra} \rightarrow ^{222}\text{Rn} \rightarrow \dots$  УР-768С эманирует радон-222.

В первую очередь необходимо исследовать зависимость эманиции радона-222 из УР-768С в специальном контейнере с системой термостатирования, которая состоит из электронагревателя, датчика температуры и блока регулирования и контроля температуры УР-768С.

Для моделирования теплового процесса в таком устройстве необходимо решение нестационарного уравнения теплопроводности в цилиндрической области  $\Omega$ . На рис. 1 показано диаметральное сечение цилиндрической области  $\Omega$ . Толщина дна и стенки специального контейнера равна  $l$ , наружный диаметр контейнера равен  $2R$  и высота контейнера равна  $H$ .

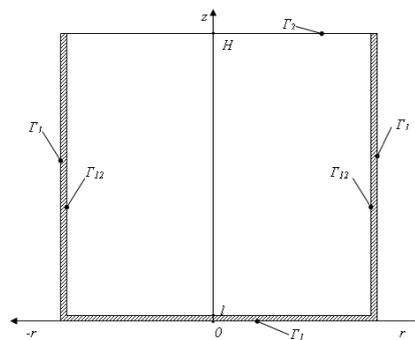


Рис. 1. Диаметральное сечение  $zOz$  цилиндрического контейнера, заправленного стандартным образцом УР-768С

**3.2.1 Математическая постановка нестационарной задачи теплопроводности представляется в следующем виде:**

$$a^2 \Delta T(r,z,t) = \frac{dT(r,z,t)}{dt}, \quad (1)$$

где  $T(r,z,t)$  - температурное поле стандартного образца УР-768С;

$a^2 = \frac{\lambda}{\rho c}$  - коэффициент температуропроводности

УР-768С;

$\rho, c$  - плотность и удельная теплоёмкость УР-768С;

$t$  - время нагревания УР-768С в форме цилиндра ( $t > 0$ ).

Нестационарное уравнение теплопроводности (1) дополняется граничными условиями:

$$T(r,z,t)|_{\Gamma_1} = T_1 = \text{const}; \quad (2)$$

$$\left[ \frac{dT(r,z,t)}{dv} + hT(r,z,t) \right]_{\Gamma_2} = 0; \quad h = \frac{\alpha}{\lambda}, \quad (3)$$

где  $\Gamma_1$  - граница области  $\Omega$ , состоящая из нижнего основания ( $z=0$ ), внешней цилиндрической поверхности ( $r=R, 0 \leq z \leq H$ ) и верхнего основания  $\Gamma_2(z=H)$  с коэффициентом теплообмена  $\alpha$  в камеру накопления радона, содержащую очищенный от пыли, влаги и фонового радона воздух при нормальном давлении и температуре  $T_0$ ;

$\Gamma_{12}$  - граница внутренней боковой поверхности, на которой выполняются условия равенства температур и тепловых потоков (граничные условия четвёртого ряда):

$$T_1|_{\Gamma_{12}} = T(r,z,t)|_{\Gamma_{12}}; \quad (4)$$

$$\lambda_1 \frac{\delta T_1}{\delta v} \Big|_{\Gamma_{12}} = \lambda \frac{\delta T(r,z,t)}{\delta v} \Big|_{\Gamma_{12}}. \quad (5)$$

Уравнение в частных производных (1) с граничными условиями (2-5) дополняется начальным условием

$$T(r,z,t)|_{t=0} = T_0. \quad (6)$$

Нестационарная краевая задача (1-6) поставлена для аксиально-симметричной области  $\Omega$

в приближении  $\frac{1}{H} < 100$ , что физически соответствует

толщинам стенки контейнера  $10^{-4}$ м и  $10^{-3}$ м из нержавеющей стали (12Х18Н10Т) и вольфрама (W), соответственно.

Ограничение задачи  $\frac{1}{H} < 100$  будет снято при переходе к стационарной краевой задаче (1-6).

**3.2.2 Решение нестационарной задачи теплопроводности**

Нестационарная краевая задача теплопроводности (1-6) решается последовательным применением метода конечных разностей [17] и метода R-функций (RFM) [18].

Разностная схема по переменной  $t$

$$\frac{T_i - T_{i-1}}{\tau_0} = \frac{\delta T(r,z,t)}{\delta \tau} \quad (7)$$

приводит уравнение (1) к следующему соотношению

$$-a^2 \Delta T_i + \frac{T_i}{\tau_0} = \frac{T_{i-1}}{\tau_0}, \quad (i=1 \div n) \quad (8)$$

с граничными условиями

$$T_i(r,z,\tau_0)|_{\Gamma_1} = T_1; \quad (9)$$

$$\left[ \frac{\delta T_i(r,z,\tau_0)}{\delta v} + hT_i(r,z,\tau_0) \right]_{\Gamma_2} = 0, \quad (10)$$

где  $\tau_0$  - шаг разбиения по переменной  $t$ ,

$T_{i-1}$  - значение температуры на предыдущем временном слое (при  $i=1, T_{i-1}=T_0$ ).

На каждом временном слое ( $i=1 \div n$ ) решение задачи (8-10) представляются в аналитическом виде с использованием теории RFM [18]:

$$T = \frac{B_1 \omega_2^2 + B_2 \omega_1}{\omega_1 + \omega_2^2}, \quad (11)$$

где  $B_1 = \omega_1 \Phi + T_{1i}$ ,

$B_2 = \Phi + \omega_2 T_2 - \omega_2 D_1^{(2)} \Phi - \omega_2 h \Phi$ ,  $\omega_1 = f_1 \wedge_0 f_{01}$ ,

$f_{01}$  - уравнение границы верхнего торца контейнера, заполненного полностью УР-678С,

$\omega_{11}$  - уравнение границы цилиндрического контейнера, заполненного полностью УР-678С без верхнего торца,

$\wedge_0$  - символ R-операции ( $\wedge_0 y = x + y - \sqrt{x^2 + y^2}$ ),

$D_1^{(2)}$  - специальные дифференциальные операторы, используемые в теории R-функций

( $D_1^{(2)} f = \frac{\delta f}{\delta x} \cdot \frac{\delta \omega_2}{\delta x} + \frac{\delta f}{\delta y} \cdot \frac{\delta \omega_2}{\delta y}$ ), в качестве функции  $\Phi$

выбраны классические полиномы Чебышева.

Соотношение (11) удовлетворяет точно граничным условиям, а также условиям сопряжения на каждом временном слое.

Для геометрических размеров контейнера  $D=H=100$ мм [11], физических характеристик контейнера, стандартного образца урановой руды УР-768С (табл. 1) и коэффициентов теплоотдачи  $\alpha$

с поверхности УР-768С  $8 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{°К}}$ ,  $10 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{°К}}$ ,  $12 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{°К}}$

получены численные распределения температурных полей как при выходе на стационарный режим, так и в установившемся стационарном тепловом режиме стандартного образца УР-768С.

Таблица 1

Физические характеристики материалов и стандартного образца урановой руды УР-768С

	Нержавеющая сталь 12Х18Н10Т	Титан ВТ-6	Вольфрам W+5Мо	УР-768С
$\lambda, \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{°К}}$	15,0	22,0	179,0	17,0
$C, \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{°К}}$	460	522	134	116
$\rho, \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$	$7,9 \cdot 10^3$	$4,5 \cdot 10^3$	$19,3 \cdot 10^3$	$12 \cdot 10^3$

Численные исследования температурных полей в ряде контейнеров, заполненных стандартным образцом УР-768С, получены с использованием программного кода «Поле-3D» [19].

На рис. 2а представлено температурное поле в диаметральном сечении гз контейнера 100×100×0,5 мм из нержавеющей стали, заполненного стандартным образцом УР-768С при коэффициенте теплоотдачи УР-768С в камеру накопления радона-222 равном

$$12 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{°К}}.$$

На рис. 2б приведены нормированные значения распределений температуры в стандартном образце УР-768С для сечений z<sub>1</sub>-z<sub>7</sub> температурного поля (рис. 2а).

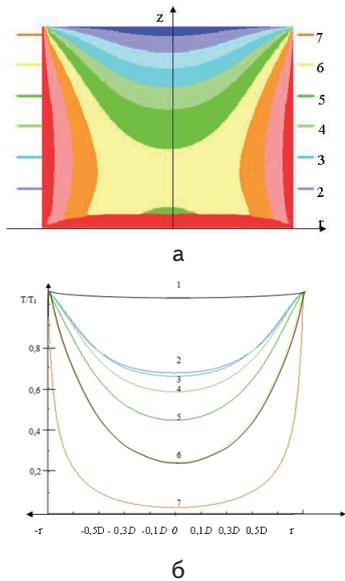


Рис. 2. Температурное поле в диаметральном сечении УР-768С: а - температурное поле стандартного образца УР-768С в диаметральном сечении гз контейнера из нержавеющей стали, б - нормированные значения распределений температуры в стандартном образце УР-768С

На рис. 3а, рис. 3б, рис. 3в представлены температурные поля в диаметральном сечении гз контейнера 100×100×1,0 мм из нержавеющей стали (рис. 3а), титана (рис. 3б), вольфрама (рис. 3в), заполненных стандартным образцом УР-768С при коэффициенте теплоотдачи УР-768С в камеру накопления радона-222

$$\text{равном } 8 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{°К}}.$$

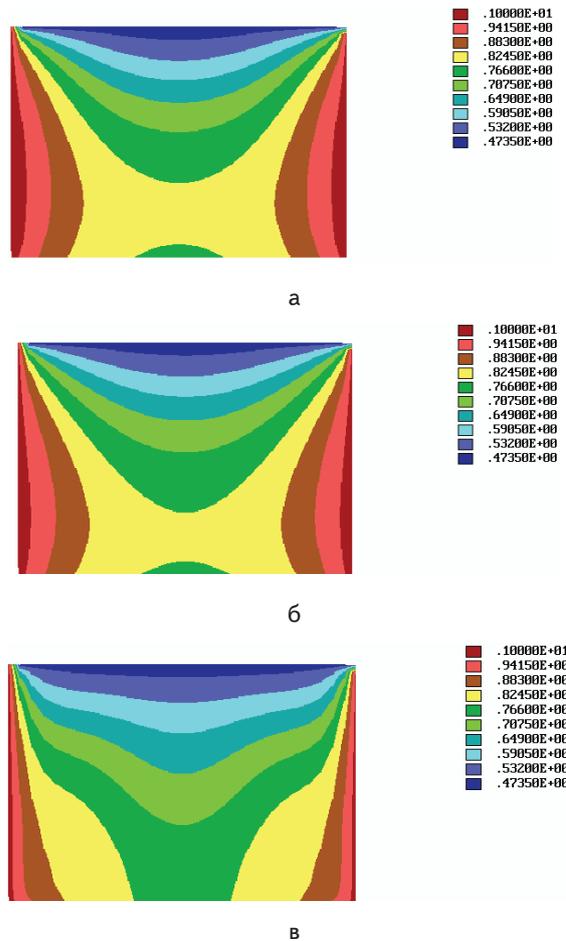


Рис. 3. Температурные поля в диаметральном сечении УР-768С в контейнерах: а - температурное поле в диаметральном сечении гз контейнера из нержавеющей стали, заполненного стандартным образцом УР-768С, б - температурное поле в диаметральном сечении гз контейнера из титана, заполненного стандартным образцом УР-768С, в - температурное поле в диаметральном сечении гз контейнера из вольфрама, заполненного стандартным образцом УР-768С

Таким образом, полученные численные исследования температурных полей контейнеров, заполненных стандартным образцом урановой руды УР-768С из нержавеющей стали, титана и вольфрама показали, что оптимальные условия эманирования радона-222 обеспечивает контейнер из нержавеющей стали.

Данные исследования позволили создать эталонный источник радона-222, обладающий новизной [20] и допускающий эксплуатацию в полевых условиях при мониторинге радона-222.

### 3.2.3. Алгоритм выполнения измерений при использовании предложенной технологии экологических мониторингов радона-222

Для реализации предложенной технологии экологических мониторингов опробован следующий алгоритм выполнения измерений:

- средство измерений (СИ) объёмной активности радона-222 калибруют по встроенному в измерительный пост или передвижную лабораторию эталонному источнику радона-222 в момент начала мониторинга;

- после калибровки выполняют наблюдения объёмной активности радона-222 на объекте мониторинга;

- после выполнения наблюдений объёмной активности радона-222 на объекте мониторинга в течение 24 часов калибровку СИ повторяют и продолжают выполнять наблюдения.

Для выполнения предложенной технологии мониторингов радона необходимо на основе описанного алгоритма разрабатывать методику выполнения измерений, согласно требованиям ГОСТ 8.010 или другого международного документа, для каждого конкретного мониторинга.

### 4. Выводы

Предложена современная технология экологических мониторингов радона-222, отличающаяся от известных классических технологий включением в состав стационарных постов или передвижных лабораторий измерения объёмной активности радона-222 и других характеристик окружающей среды встроенных эталонных источников радона-222.

Теоретически исследованы температурные поля эталонного источника радона-222 состоящего из контейнера стандартного образца урановой руды УР-768С, камеры накопления радона-222 и системы термостатирования контейнера с УР-768С, обеспечивающую стабильность эманации радона-222 с УР-768С в полевых условиях.

Предложен алгоритм выполнения измерений объёмной активности радона-222 для современной технологии экологических мониторингов радона.

### Литература

1. Ozhovan, M. I. Отчёт МАГАТЭ по проекту UKR/4/009. Анализ существующей практики обращения с отходами. Совершенствование управления отходами ядерного происхождения [Текст] / М.И. Ozhovan, А. Е. Arustamov // Vienna: МАГАТЭ, 2001.
2. Висентин, А. Система радиационного контроля по периметру промплощадки Чернобыльской АЭС [Текст] / А. Висентин, Ф. Вичинанза, В. Кортази. - Roma: Radoz Technology, 2000. – 67 с.
3. Maushart, R. Radiation Protection Instrument For Environmental Monitoring [Текст] / R.Maushart, P.Nemecek. – Belgium: Berthold Group, 2011. – 35 с.
4. Высокоточный радоновый мониторинг в приземном слое атмосферы ГП «Чернобыльская АЭС» [Текст] : Наукові праці IV міжнародної науково-технічної конференції «Метрологія-2004». – Харків: ННЦ «Інститут метрології», 2004. – с.245-247.
5. Державна програма розвитку еталонної бази на 2006-2010 роки. Постанова Кабінету Міністрів України від 1 березня 2006р. №228 [Текст] : Київ: Кабінет міністрів України, 2006. – с.1-7
6. Израэль, Ю.А. Экология и контроль состояния природной среды [Текст] / Ю.А.Израэль. – М.: Гидрометеоздат, 1984. – 560с.
7. Моніторинг навколишнього середовища [Текст] // О.І. Бондар, І.В. Корінько, В.М. Ткач, О.І. Федоренко; Під редакцією проф. докт.фіз.-мат. наук, академіка АНУ Вищої школи України О.І.Федоренко. – Харків: Планета – Принт, 2005. – 123с.
8. The State Special Standard of Unit of Volume Activity Radon-222 [Текст] : IV International Conference and Discussion Scientific Club. Ukraine, Crimea, Yalta-Gurzuff May,26-June, 4 1998. – p.478-483.
9. Creation and Research of Reference Solid-State Generators of Radon-222 [Текст] : IV International Conference and Discussion Scientific Club. Ukraine, Crimea, Yalta-Gurzuff May,26-June,4 1998. – p. 469-474.
10. Кравченко, Н.И. Рабочие средства измерений активности радона и его дочерних продуктов распада [Текст] / Н.И. Кравченко, В.В. Скляр, Л.Н. Яковлева // Украинский метрологический журнал. – 1999. - № 4. - с.40-44.
11. Кравченко, Н.И. Генераторы радона-222 на основе стандартного образца урановой руды [Текст] / Н.И. Кравченко, Л.Н. Яковлев // Украинский метрологический журнал. - 1999, №1. - с.53-57.
12. Уткин, В.И. Стандартный образец радона. Патент Российской Федерации №2075092 [Текст] / В.И.Уткин, А.К.Юрков. – М.: Российское агентство по патентам и товарным знакам, 1997. - с. 3.
13. Triscone, G. Obcosute Activity Measurement of Radon Gas at IRA-METAS metINFO [Текст] / G. Triscone, M. Santon, J.-J. Gostely, J.-F. Valley and F.O. Bochud // metINFO. - 2003. – vol.10, No2. - p. 4-7.
14. Ревенко, Ю.А. Твёрдые радоновые концентраторы: новые возможности для геофизических исследований буровых скважин [Текст] / Ю.А.Ревенко, Б.А.Гаврилов, В.П.Малый // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Техническая физика и автоматизация. – 2005. – выпуск 59, часть 2. - с. 60-73.
15. Баранов, В.И. Влияние влажности на эманирование [Текст] / В.И.Баранов, А.П.Новицкая // Радиохимия. – 1960.- №4.- с.485-490.
16. Притчин, Б.П. К динамике выделения накопленного радона при нагревании горной породы [Текст] / Б.П. Притчин // Атомная энергия. – 1968. - Т.25, № 4. - с. 324-325.
17. Тихонов, А.Н. Уравнения математической физики [Текст] / А.Н.Тихонов, А.А.Самарский. – М.: Наука, 2004. – 798с.
18. Рвачёв, В.Л. Теория R-функций и некоторые её приложения [Текст] / В.Л. Рвачёв. – Киев: Наукова думка, 1982. – 552с.
19. Рвачёв, В.Л. Проблемно-ориентированные языки и системы для инженерных расчётов [Текст] / В.Л.Рвачёв, А.Н.Шевченко. – Киев: Техника, 1988. – 197с.
20. Яковлева, Л.Н., Источник радона-222. Патент Российской Федерации №2147149. Опубликовано 27.03.2000г.