

ронных лабораторных и метрологических испытаний опытный образец анализатора керна АНКР-2М передан в эксплуатацию петрофизической лаборатории института ТАТНИПИНЕФТЬ ОАО Татнефть в октябре 2002г.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Орлов Л.И., Карпов Е.Н., Топорков В.Г. Петрофизические исследования коллекторов нефти и газа. - М.: Недра, 1987.
2. Арцыбашев В.А. Ядерно-геофизическая разведка. - М.: Атомиздат, 1972.
3. Осипов В.Н. Определение плотности и влажности грунтов по рассеянию гамма-лучей и нейтронов. - М.: Изд-во МГУ, 1968.
4. Арцыбашев В.А. Гамма-метод измерения плотности. - М.: Атомиздат, 1978.
5. Волченко Ю.А. Нейтронный метод экспрессного контроля влажности проб неорганических материалов. - В кн.: Неразрушающий контроль и диагностика. - Томск: Изд-во НТЛ, 1998.
6. Патент Российской Федерации №2008656. Устройство для анализа кернов нефтеносных пород (его варианты). Волченко Ю.А., Пинкин В.Ф., Сурков А.С., Клименков Н.П., Козлова В.В. -1994, МКИ G01 №23/02.
7. Патент Российской Федерации №2114418. Устройство для анализа кернов нефтеносных пород. Волченко Ю.А. - 1998, МКИ G01 №23/02, 23/06, G01V 5/14.

УДК 621.039.84:543.71

Ю.А. ВОЛЧЕНКО

МНОГОГРУППОВАЯ ДИФфуЗИОННО-ВОЗРАСТНАЯ ТЕОРИЯ НЕЙТРОННОЙ ВЛАГОМЕТРИИ ГОМОГЕННЫХ СРЕД ПРОИЗВОЛЬНОГО ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА

Описана многогрупповая диффузионно-возрастная теория нейтронной влагометрии гомогенных сред произвольного химического состава, которая позволяет рассчитывать показания детектора нейтронов в различных условиях контроля (пробы сыпучих и пластических материалов, ленточный транспортер, трубопровод и т. д.) с учетом эффективности регистрации нейтронов детектором и энергетического спектрального распределения нейтронов источника. Приведены некоторые результаты применения теории. Описаны нейтронные влагомеры НИ10ВШ, НИ10ВА, НИ20ВБ, анализатор кернов нефтеносных пород АНКР-2М и комплекс технических средств экспрессного контроля параметров буровых растворов при бурении нефтегазопромысловых скважин КИБР, при разработке нейтронных датчиков которых использовалась эта теория.

Введение

Влажность исходного сырья, полуфабрикатов или конечной продукции является одним из основных параметров, подлежащих непрерывному или периодическому контролю в различных технологических процессах, при строительстве автомобильных дорог и взлетно-посадочных полос аэропортов, при инженерных изысканиях и т. д.

Потребность в экспрессном контроле влажности удовлетворяется с помощью приборов – влагомеров, в том числе и с помощью нейтронных влагомеров, которые обладают рядом преимуществ перед влагомерами других типов (тепловыми, инфракрасными, высокочастотными и СВЧ-влагомерами), а именно: экспрессностью, слабой зависимостью результатов измерения от флуктуаций плотности контролируемого материала, возможностью контроля влажности через металлические стенки контейнеров для проб, массопроводов, бункеров – дозаторов и хорошей представительностью анализа.

Вместе с тем нейтронные влагомеры имеют присущую только им особенность, а именно сильную зависимость характеристик конкретного влагомера от взаимного рас-

положения источника нейтронов, детектора нейтронов и контролируемого объекта, а также от энергии нейтронов источника и эффективности регистрации нейтронов детектором.

В результате анализа практических задач влагометрии, которые могут быть решены или уже решаются с помощью нейтронных влагомеров, с позиций взаимного расположения источника нейтронов, детектора нейтронов и объекта контроля, нами предложена классификация типов геометрий контроля, показанная на рис. 1. К бесконечной геометрии контроля относятся измерения в различных скважинах, в бункерах-дозаторах больших размеров, когда зонд нейтронного влагомера может быть введен внутрь бункера. К полубесконечной геометрии контроля относятся измерения через стенку бункеров-дозаторов, измерения влажности сырья в железнодорожных вагонах, кузовах автомобилей, влажности грунта при строительстве автомобильных дорог и т. п. К барьерной геометрии относятся измерения на ленточных транспортерах, в трубопроводах, в тонких железобетонных и других изделиях. К конечной геометрии контроля относятся измерения влажности проб различных материалов, в том числе помещенных в металлические контейнеры, кернов нефтеносных пород, кернов почво-грунтов и т. п.

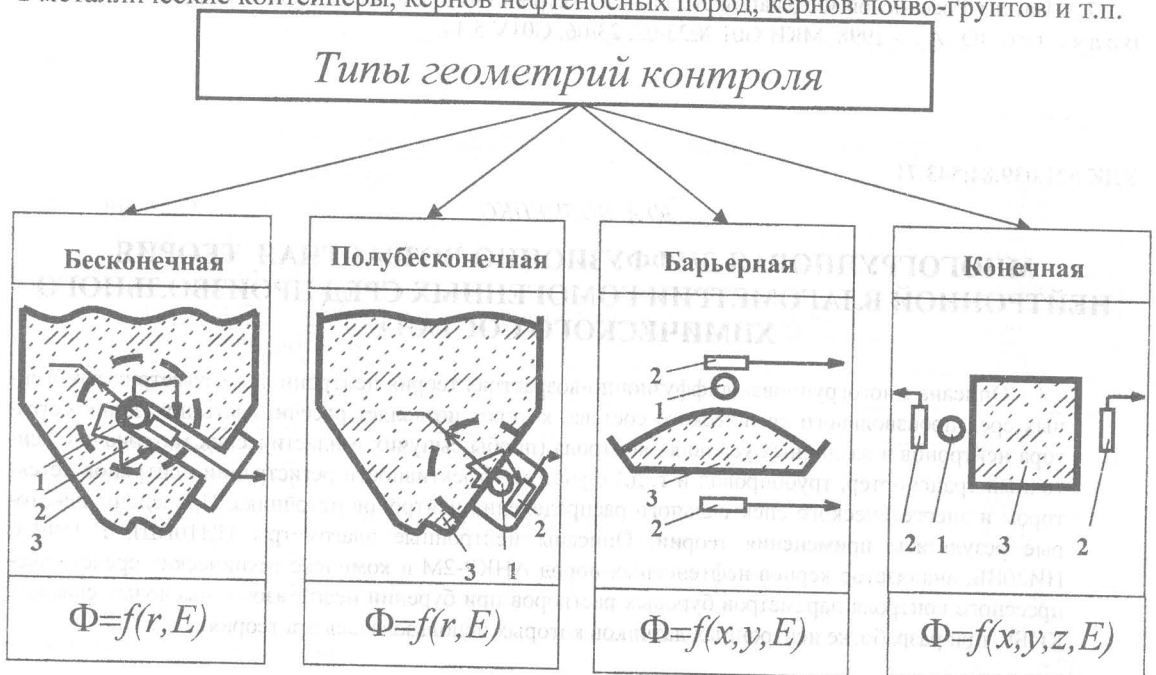


Рис. 1. Классификация геометрий контроля в нейтронной влагометрии: 1 – радионуклидный источник нейтронов, 2 – детектор нейтронов, 3 – объект контроля, R – радиус сферы (полусферы) сбора информации нейтронами.

Качество нейтронных влагомеров принято оценивать с помощью относительно-абсолютной чувствительности, которая имеет вид [1]:

$$\eta = \frac{\Delta P}{P_0} \cdot \Delta W, \quad (1)$$

где P_0 – показание детектора нейтронов при минимальной массовой доле влаги W_0 ,

ΔP – изменение показаний детектора, соответствующее изменению влажности на ΔW ,

ΔW – диапазон изменения влажности.

Для нахождения величины ΔP и P_0 необходимо описать перенос нейтронов в гомогенной среде для каждой из указанных геометрий контроля с учетом энергетического спектрального распределения нейтронов источника, химсостава объекта контроля, его влажности и эффективности регистрации нейтронов различных энергий детектором нейтронов, т. е. найти величину плотности потока нейтронов для различных энергетических

ческих групп, падающих на детектор нейтронов и умножить ее на величину соответствующей эффективности регистрации этих нейтронов детектором.

Если источник нейтронов имеет постоянную мощность, то плотность потока нейтронов можно найти, используя известное стационарное кинетическое уравнение Больцмана [2]. Точное аналитическое решение этого уравнения для среды произвольного состава и различных геометрических условий до сих пор не получено ввиду трудностей математического характера, поэтому на практике пользуются численными методами его решения (метод Монте-Карло, метод конечных разностей) либо приближенными методами, позволяющими в частных случаях получить аналитическое решение. К приближенным методам решения кинетического уравнения относятся в первую очередь диффузионное, возрастное, диффузионно-возрастное и многогрупповые приближения [2, 3, 4]. Однако до сих пор получены аналитические решения только для однородной бесконечной среды в одногрупповом диффузионно-возрастном приближении [5, 6] и для однородной полубесконечной среды в трехгрупповом диффузионном приближении [7], в которых энергетическое спектральное распределение нейтронов источника не учитывается, а эффективность регистрации нейтронов детектором учитывается только частично. В настоящей работе сделана попытка получить аналитические решения в многогрупповом диффузионно-возрастном приближении для всех основных типов геометрий контроля нейтронной влагометрии.

Основные положения и результаты теории

Пусть однородная среда произвольного химического состава занимает некоторый объем G с граничной поверхностью S . Моноэнергетический источник мощности Q , испускающий нейтроны, возраст τ которых равен нулю, расположен в некоторой точке M_0 поверхности S . Пусть детектор, регистрирующий нейтроны, расположен на поверхности S и занимает некоторую площадь S_1 с центром в точке M_1 . Считаем, что в многогрупповом приближении детектор нейтронов имеет эффективность регистрации нейтронов ε , определяемую формулой:

$$\varepsilon = \sum_{j=j_{нач.}}^{j_k} \varepsilon_j, \quad (2)$$

где ε_j - эффективность регистрации нейтронов j -й группы; $j_{нач.}$ - энергетическая группа нейтронов, испускаемых источником; j_k - энергетическая группа тепловых нейтронов.

Тогда показание детектора, регистрирующего все нейтроны с энергиями от энергии нейтронов источника до тепловой энергии, будем описывать формулой:

$$\Pi = Q \sum_{j=j_{нач.}}^{j_k} \varepsilon_j \cdot \Delta\Psi_j, \quad (3)$$

где Q - мощность источника нейтронов; $\Delta\Psi_j$ - количество нейтронов j -й группы, упавших на площадь детектора S_1 за единицу времени.

Функция $\Delta\Psi_j$ определяется формулой

$$\Delta\Psi_j = \beta_j \int_{\tau_{j-1}}^{\tau_j} d\tau \iint_{S_1} q(M, \tau) dS, \quad (4)$$

где $q(M, \tau)$ - плотность замедления нейтронов возраста τ от источника нейтронов, расположенного в точке M_0 ; $\beta_j = \frac{1}{D_j}$; D_j - коэффициент диффузии нейтронов j -й энергетической группы.

Интегрирование производится по площади детектора S_j .

Плотность замедления $q(M, \tau)$ можно найти путем решения уравнения возраста:

$$\frac{\partial q(M, \tau)}{\partial \tau} = \nabla^2 q(M, \tau) - \alpha^2(\tau) q(M, \tau); \quad M \in G, \tau > 0, \quad (5)$$

где $\alpha^2(\tau) \equiv \Sigma_a(\tau)/D(\tau)$ - коэффициент, учитывающий поглощение нейтронов возраста τ в гомогенной среде; $\Sigma_a(\tau)$ - сечение поглощения нейтронов возраста τ в гомогенной среде; $D(\tau)$ - коэффициент диффузии нейтронов возраста τ .

Начальное условие для уравнения возраста запишем в виде

$$q(M, \tau)|_{\tau=0} = Q \cdot \delta(M - M_0), \quad (6)$$

где $\delta(M - M_0)$ - дельта функция Дирака.

В качестве граничного условия выберем условие отсутствия потока нейтронов извне области G через поверхность S :

$$2 \cdot D(\tau) \frac{\partial q(M, \tau)}{\partial n} + q(M, \tau)|_S = 0, \quad (7)$$

где n - нормаль к поверхности S .

Учитывая, что плотность потока нейтронов $\Phi(M, \tau)$, приходящаяся на единицу возраста τ , можно записать в виде [2]:

$$\Phi(M, \tau) = \beta(\tau) \cdot q(M, \tau) \quad (8)$$

и, решая уравнение возраста (5) классическим методом Фурье, получаем для различных геометрий контроля следующие результаты.

1. Проба в форме прямоугольного параллелепипеда.

Поместим начало координат в центр пробы и будем считать, что $|x| < a$; $|y| < b$; $|z| < c$. Пусть моноэнергетический источник находится в центре грани $x = -a$. Тогда решение задачи (5-7) можно записать в виде

$$q = Q \cdot q_x(x, \tau) \cdot q_y(y, \tau) \cdot q_z(z, \tau) \cdot e^{-\int_{\tau_{\text{исм}}}^{\tau} \alpha^2(\tau) d\tau}, \quad (9)$$

где

$$\begin{aligned} q_x(x, \tau) &= \sum_{i=1}^{\infty} \sum_{m=1}^2 \frac{X_{im}(-a)}{\|X_{im}\|^2} X_{im}(x) e^{-\lambda_{im}^2 \frac{(\tau - \tau_{\text{исм}})}{a^2}}, \\ q_y(y, \tau) &= \sum_{j=1}^{\infty} \frac{1}{\|Y_j\|^2} Y_j(y) e^{-\mu_j^2 \frac{(\tau - \tau_{\text{исм}})}{b^2}}, \\ q_z(z, \tau) &= \sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{\|Z_k\|^2} Z_k(z) e^{-\nu_k^2 \frac{(\tau - \tau_{\text{исм}})}{c^2}}. \end{aligned} \quad (10)$$

Здесь $X_{i1}(x) = \cos \lambda_{i1}(x/a)$, $X_{i2}(x) = \sin \lambda_{i2}(x/a)$, $Y_j(y) = \cos \mu_j(y/b)$, $Z_k(z) = \cos \nu_k(z/c)$ - собственные функции задачи; собственные числа λ_{im} , μ_j , ν_k являются корнями трансцендентных уравнений;

$$\operatorname{tg} \lambda_{i1} = \frac{a}{2D\lambda_{i1}}, \operatorname{tg} \lambda_{i2} = -\frac{2D\lambda_{i2}}{a}, \operatorname{tg} \mu_j = \frac{b}{2D\mu_j}, \operatorname{tg} \nu_k = \frac{c}{2D\nu_k}; \quad (11)$$

$\|X_{im}\|^2$, $\|Y_j\|^2$ и $\|Z_k\|^2$ - квадраты норм собственных функций:

$$\|X_{im}\|^2 = a \left(1 + \frac{p_a}{\lambda_{im}^2 + p_a^2} \right), \quad p_a = \frac{a}{2D}, \quad m=1,2;$$

$$\|Y_j\|^2 = b \left(1 + \frac{p_b}{\mu_j^2 + b^2} \right), \quad p_b = \frac{b}{2D},$$

$$\|Z_k\|^2 = c \left(1 + \frac{p_c}{\nu_k^2 + c^2} \right), \quad p_c = \frac{c}{2D}.$$

2. Транспортная лента.

В отличие от пробы здесь один из размеров, например z , меняется в бесконечных пределах $-\infty < z < +\infty$, а $|x| < a$, $|y| < b$ по-прежнему. В этом случае изменяется только вид, составляющей выражения (9) для $q(x, y, z, \tau)$, зависящей от z :

$$q_z(z, \tau) = \frac{1}{2\sqrt{\pi(\tau - \tau_{\text{усм}})}} e^{-\frac{z^2}{4(\tau - \tau_{\text{усм}})}}, \quad (12)$$

а остальные составляющие останутся как в (10 - 11).

3. Полупространство $0 < x < +\infty$, $|y| < \infty$, $|z| < \infty$.

В этом случае составляющая $q_y(y, \tau)$ принимает вид, аналогичный (12):

$$q_y(y, \tau) = \frac{1}{2\sqrt{\pi(\tau - \tau_{\text{усм}})}} e^{-\frac{y^2}{4(\tau - \tau_{\text{усм}})}}, \quad (13)$$

а

$$q_x(x, \tau) = e^{-\frac{x^2}{4(\tau - \tau_{\text{усм}})}} \left[\frac{1}{\sqrt{\pi(\tau - \tau_{\text{усм}})}} - \frac{1}{2D} e^{\frac{(\tau - \tau_{\text{усм}} + Dx)^2}{4D^2(\tau - \tau_{\text{усм}})}} \cdot \operatorname{erfc} \left(\frac{\tau - \tau_{\text{усм}} + Dx}{2D\sqrt{\tau - \tau_{\text{усм}}}} \right) \right], \quad (14)$$

где $\operatorname{erfc}(u) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_u^\infty e^{-t^2} dt$ - дополнительный интеграл вероятности.

4. Неограниченное пространство.

В этом случае формула (9) максимально упрощается и превращается в формулу фундаментального решения уравнения возраста:

$$q(x, y, z, \tau) = \frac{Q}{[4\pi(\tau - \tau_{\text{усм}})]^{3/2}} e^{-\frac{x^2 + y^2 + z^2}{4(\tau - \tau_{\text{усм}})}} \cdot e^{-\int_{\tau_{\text{усм}}}^{\tau} \alpha^2(\tau) d\tau}. \quad (15)$$

5. Трубопровод: $0 \leq r \leq r_0$; $-\pi < \varphi \leq \pi$; $|z| < \infty$.

В уравнении (5) перейдем к цилиндрическим координатам.

Тогда оно примет вид

$$\frac{\partial q}{\partial \tau} = \frac{\partial^2 q}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial q}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 q}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 q}{\partial z^2} - \alpha^2 q. \quad (16)$$

Поместим источник на поверхности цилиндра в точке с координатами $r=r_0$, $\varphi=0$, $z=0$.

Тогда начальное условие запишется в виде

$$q|_{\tau=\tau_{ист}} = \frac{Q}{r} \delta(r - r_0, \varphi, z). \quad (17)$$

Граничное условие

$$2D \frac{\partial q}{\partial r} + q|_{r=r_0} = 0. \quad (18)$$

Решением задачи (16-18) является функция

$$q = Q \cdot q_r(r, \varphi, \tau) q_z(z, \tau) e^{-\int_{\tau_{ист}}^{\tau} \alpha^2(\tau) d\tau}, \quad (19)$$

где $q_z(z, \tau)$ имеет вид (12), а

$$q_r(r, \varphi, \tau) = \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{J_n(\lambda_{nk})}{\|\Phi_n\|^2 \cdot \|J_n\|^2} J_n\left(\lambda_{nk} \frac{r}{r_0}\right) \cos n\varphi \cdot e^{-\lambda_{nk}^2 \frac{r-r_{ист}}{r_0^2}}. \quad (20)$$

Здесь $J_n\left(\lambda_{nk} \frac{r}{r_0}\right)$ - функции Бесселя порядка n , λ_{nk} - собственные числа, являющиеся корнями уравнений

$$\frac{2D}{r_0} \lambda J'_n(\lambda) + J_n(\lambda) = 0, \quad (21)$$

а $\|\Phi_n\|^2$ и $\|J_n\|^2$ - квадраты норм собственных функций:

$$\|\Phi_n\|^2 = \begin{cases} 2\pi, & n=0 \\ \pi, & n \neq 0 \end{cases} \quad (22)$$

$$\|J_n\|^2 = \frac{r_0^2}{2} \left\{ 1 + \left(\frac{r_0^2}{4D^2} - n^2 \right) \cdot \frac{1}{\lambda_{nk}^2} \right\} \cdot J_n^2(\lambda_{nk}).$$

Приведенные выше формулы отвечают случаю моноэнергетического источника нейтронов мощности Q . В случае полиэнергетического источника нейтронов представим его в виде суперпозиции моноэнергетических источников:

$$Q = \sum_{i=i_n}^{i_k} Q_i \delta(\tau - \tau_i) \quad (23)$$

и производим соответствующие вычисления по формулам (9, 10, 12, 13, 14, 19, 20).

Программы, по которым табулировались функции, входящие в решения перечисленных задач, были реализованы на языке Turbo Pascal-7. Корни трансцендентных уравнений находились методом простой итерации. Интегралы по площади детектора в формуле (3) вычислялись аналитически. Интегралы по τ в задачах 2, 3, 5 вычислялись численно методом Симпсона с автоматическим выбором шага. При этом в задачах (2, 3, 5) избавлялись от особенности при $\tau=\tau_{ист}$ заменной переменной интегрирования $\tau - \tau_{ист} = t^2$.

Некоторые результаты применения теории

С помощью этой теории можно определять оптимальную энергию нейтронов источника для конкретных геометрических условий контроля и химсостава гомогенной среды, варьируя энергию моноэнергетического источника нейтронов и используя кри-

терий относительно-абсолютной чувствительности, по которому принято оценивать качество нейтронных влагомеров (1).

Кроме того, можно непосредственно сравнивать источники нейтронов с различными энергетическими спектральными характеристиками в одинаковых условиях контроля и таким образом выбирать наиболее подходящий источник нейтронов.

Так, например, на рис. 2, а показан выбор источника нейтронов для керна нефтеносных пород диаметром и высотой, равным 100 мм, диаметром и высотой, равным 150 мм. На рис. 2, б показана экспериментальная проверка правильности выбора источника.

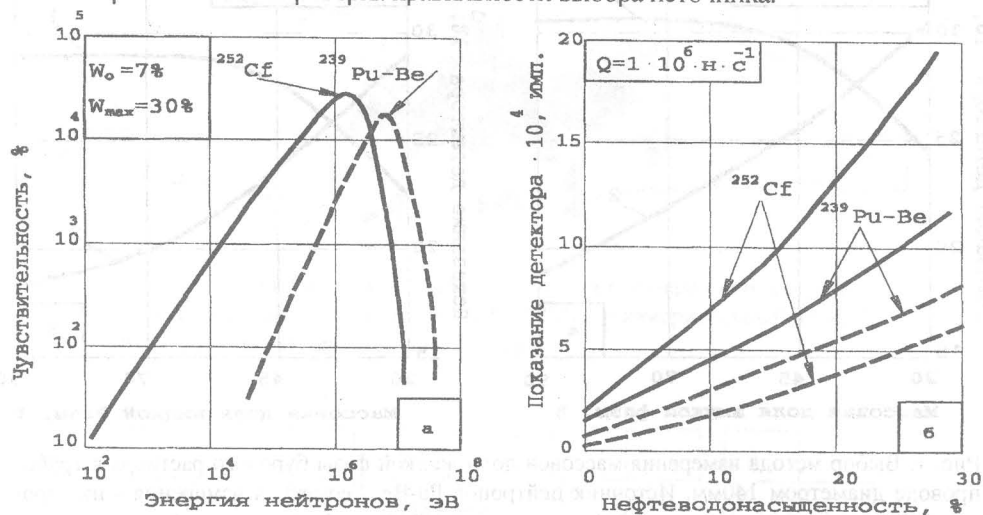


Рис. 2. Выбор типа источника нейтронов для песчаникового керна по критерию η (а) и экспериментальная проверка правильности выбора (б): - $\varnothing 100\text{мм}$, -- $\varnothing 150\text{мм}$

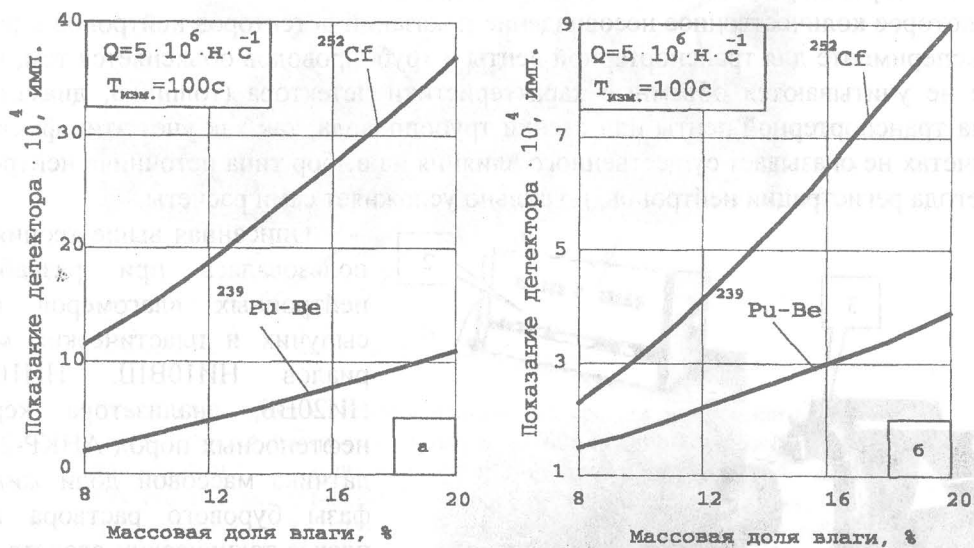


Рис. 3. Выбор источника нейтронов по показанию детектора нейтронов при одинаковой мощности источников с различным энергетическим спектральным распределением нейтронов: а - расчет, б - эксперимент

Видно, что источник Cf ²⁵² ($E_{cp} = 2,5 \text{ МэВ}$) обеспечивает погрешность в 2 раза меньше, чем источник Pu ²³⁹- Be ($E_{cp} = 5,5 \text{ МэВ}$) для керна диаметром 100мм. Для керна диаметром 150мм ситуация обратная.

На рис. 3 показан выбор источника нейтронов для ленточного транспортера шириной 40 см, транспортирующего свежеприготовленную бетонную смесь толщиной

10 см. Видно, что лучшие результаты, в данном случае, обеспечивают применение источника Cf^{252} .

На Рис. 4 проиллюстрирован выбор метода регистрации нейтронов для определения массовой доли жидкой фазы бурового раствора, прокачиваемого по трубопроводу с внутренним диаметром 120 мм.

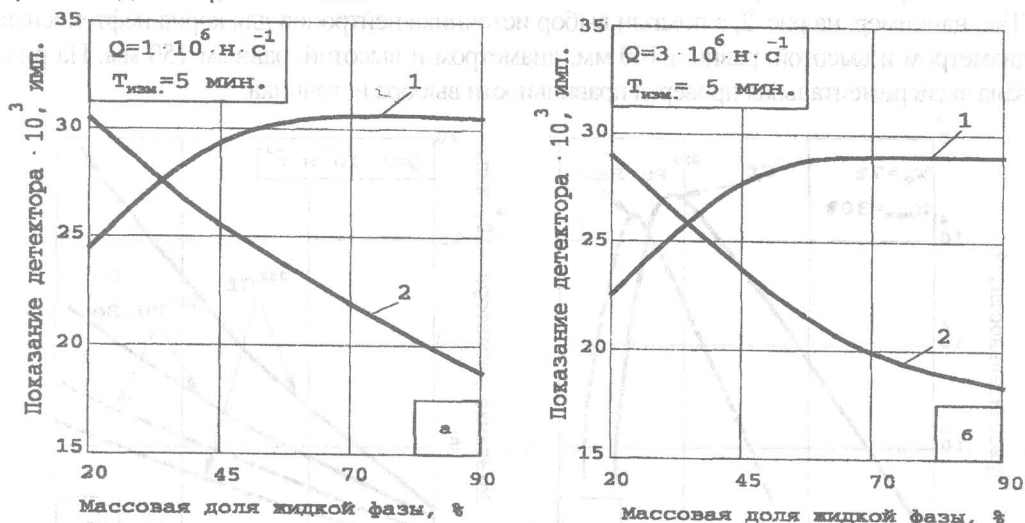


Рис. 4. Выбор метода измерения массовой доли жидкой фазы бурового раствора в трубопроводе диаметром 140мм. Источник нейтронов Pu-Be. Геометрия измерения - на "просвет" (а - расчет, б - эксперимент): 1 - медленные нейтроны, 2 - быстрые нейтроны

Видно, что метод ослабления быстрых нейтронов обеспечивает лучшие результаты, чем метод регистрации замедлившихся нейтронов.

Некоторое количественное несовпадение показаний детекторов нейтронов в расчетах и эксперименте для транспортной ленты и трубопроводов объясняется тем, что в расчете не учитываются объемные характеристики детектора (толщина, диаметр) и толщина транспортной ленты или стенки трубопровода, так как учет этих факторов при расчетах не оказывает существенного влияния на выбор типа источника нейтронов либо метода регистрации нейтронов, но сильно усложняет сами расчеты.

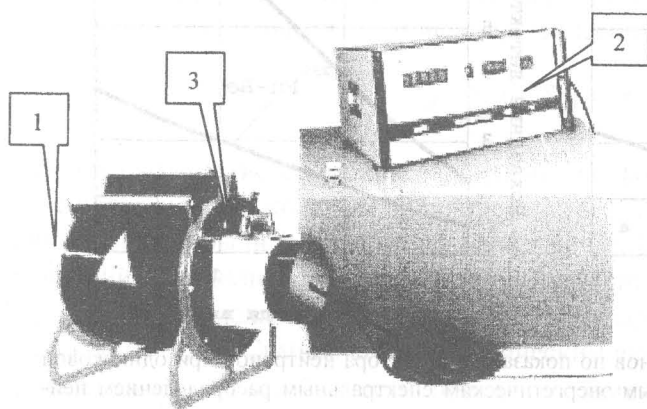


Рис. 5. Общий вид нейтронных влагомеров проб сыпучих и пластических неорганических материалов НИ10ВЩ, НИ10ВА, НИ20ВБ: 1 - измерительный блок; 2 - пульт; 3 - контейнер с пробой

Описанная выше теория использовалась при разработке нейтронных влагомеров проб сыпучих и пластических материалов НИ10ВЩ, НИ10ВА, НИ20ВБ, анализатора кернов нефтеносных пород АНКР-2М и датчика массовой доли жидкой фазы бурового раствора комплекса технических средств экспрессного контроля параметров буровых растворов при бурении нефтегазопромысловых скважин КИБР, показанных на рис. 5, рис.6 и рис. 7.

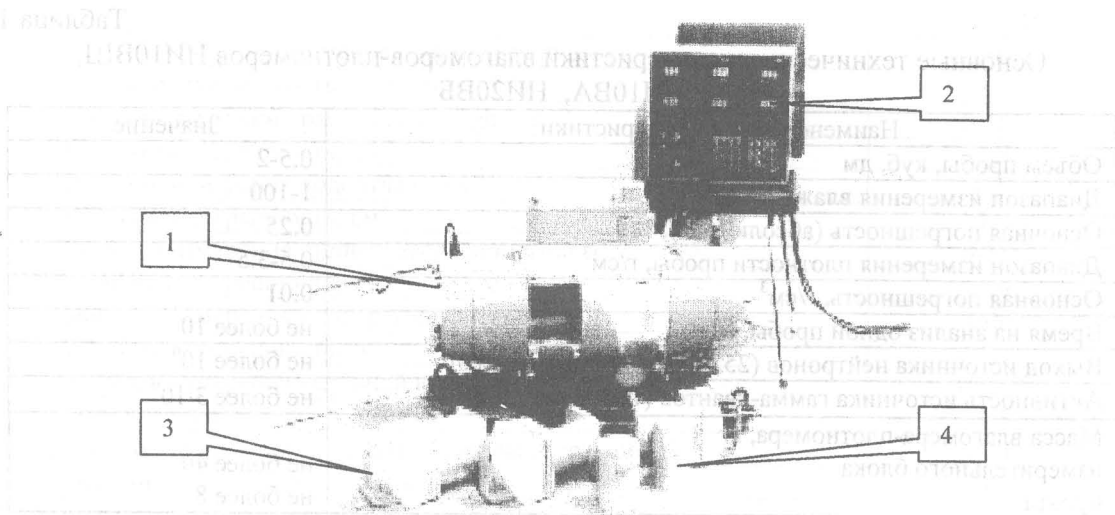


Рис. 6. Общий вид анализатора (влажмера - плотномер - концентратомера) кернов нефтеносных пород АНКР-2М: 1 – измерительный блок; 2 – пульт; 3 – контейнер с керном; 4 – керн

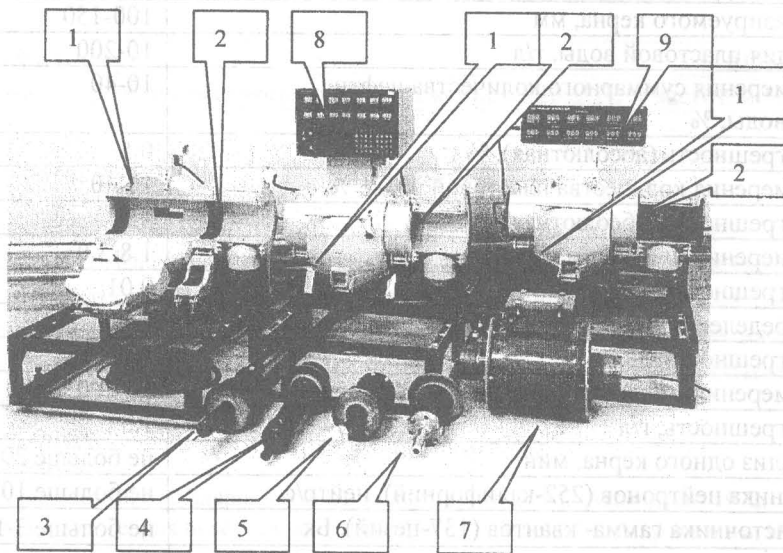


Рис. 7. Общий вид комплекса технических средств экспрессного контроля параметров буровых растворов КИБР: 1- датчик массовой доли жидкой фазы; 2 – датчик плотности; 3 – датчик температуры; 4 - датчик степени засоленности; 5 – датчик удельного сопротивления; 6 – датчик вязкости; 7 – датчик расхода; 8 – основной пульт; 9 – табло пульты бурового раствора

В табл. 1, 2, 3 приведены основные технические характеристики влажмеров-плотномеров НИ10ВШ, НИ10ВА, НИ20ВБ, анализатора кернов нефтеносных пород АНКР-2М и комплекса технических средств экспрессного контроля параметров буровых растворов при бурении нефтегазопромысловых скважин КИБР.

Таблица 1

Основные технические характеристики влагомеров-плотномеров НИ10ВЩ,
НИ10ВА, НИ20ВВ

Наименование характеристики	Значение
Объем пробы, куб. дм	0.5-2
Диапазон измерения влажности, %	1-100
Основная погрешность (абсолютная), %	0.25
Диапазон измерения плотности пробы, г/см ³	0.5-3.5
Основная погрешность, г/см ³	0.01
Время на анализ одной пробы, мин	не более 10
Выход источника нейтронов (252-калифорний), нейтр./с	не более 10 ⁶
Активность источника гамма-квантов (137-цезий), Бк	не более 3·10 ⁹
Масса влагомера-плотномера, кг	не более 40
измерительного блока	не более 8
пульта	

Таблица 2

Основные технические характеристики анализатора кернов АНКР-2М

Наименование характеристики	Значение
Диаметр анализируемого керна, мм	60-100
Высота анализируемого керна, мм	100-150
Минерализация пластовой воды, г/л	10-200
Диапазон измерения суммарного количества нефти и пластовой воды, %	10-40
Основная погрешность (абсолютная), %	0.5
Диапазон измерения количества пластовой воды, %	10-40
Основная погрешность (абсолютная), %	1.0
Диапазон измерения плотности керна, г/см ³	1.8-3.0
Основная погрешность, г/см ³	0.01
Диапазон определения коэффициента пористости керна, %	0-40
Основная погрешность, %	1.12
Диапазон измерения минерализации пробы воды, г/л	10-200
Основная погрешность, г/л	1.5
Время на анализ одного керна, мин	не больше 20
Выход источника нейтронов (252-калифорний), нейтр./с	не больше 10 ⁶
Активность источника гамма-квантов (137-цезий), Бк	не больше 3·10 ⁹
Масса анализатора, кг	не больше 30
измерительного блока	не больше 8
пульта	
Питание от сети переменного тока напряжением 220 ±22В и частотой 50±0,5Гц.	

Таблица 3

Основные технические характеристики комплекса «КИБР»

Наименование характеристики	Значение
Диапазон измерения плотности на входе/выходе скважины, г/см ³	0,8-2,5
Основная погрешность, г/см ³	0,01
Диапазон измерения массовой доли жидкой фазы на входе/выходе скважины, %	40-100
Основная погрешность (абсолютная), %	1,0
Диапазон измерения массовой доли твердой фазы на входе/выходе скважины, %	0-100

Таблица 3

Наименование характеристики	Значение
Основная погрешность (абсолютная), %	1,5
Диапазон измерения расхода на входе, л/с	0-100
Основная погрешность, л/с	1,5
Диапазон измерения водоотдачи, см ³	4-20
Основная погрешность, см ³	1,0
Диапазон измерения степени засоленности, г/л	0-150
Основная погрешность, г/л	1,0
Диапазон измерения температуры, °С	0-80
Основная погрешность, °С	1,0
Диапазон измерения условной вязкости, с	15-120
Основная погрешность, с	1,5
Диапазон измерения газосодержания раствора, об. %	0-10
Основная погрешность, об. %	0,6
Диапазон температуры окружающей среды для датчиков плотности, массовой доли жидкой фазы, газосодержания, расхода и пульта бурьлищика, °С	-45 - +45
Диапазон температуры окружающей среды для датчиков водоотдачи, вязкости, степени засоленности и температуры раствора, °С	0-45
Диапазон температуры окружающей среды для пульта комплекса, °С	10-35
Исполнение датчиков	взрывобезопасное
Питание от сети переменного тока напряжением 220±22В и частотой 50±0,5Гц.	

Заключение

Разработанная нами многогрупповая диффузионно-возрастная теория нейтронной влагометрии для гомогенных сред произвольного химического состава и геометрических форм, характерных для практических задач нейтронной влагометрии (пробы, транспортеры, трубопроводы, бункера – дозаторы и т.д.), позволяет выбрать в каждом случае наиболее подходящий источник нейтронов для детектора нейтронов с заданной эффективностью регистрации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. В. А. Арцыбашев. Ядерно-геофизическая разведка /-М.: Атомиздат, 1972.
2. Б. Дэвисон. Теория переноса нейтронов / Пер. с англ. В. Н. Морозова, О. А. Сальникова. Под ред. проф. Г. И. Марчука. – М.: Атомиздат, 1960.
3. Бекурц К., Виртц К. Нейтронная физика / Пер. с англ. И. Л. Чихладзе, А. Д. Климанова. Под ред. А. Л. Микаэляна, В. И. Лебедева. – М.: Атомиздат, 1968.
4. Р. Мегреблиан, Д. Холмс. Теория реакторов / Пер. с англ. Под ред. П. А. Гаврилова. – М.: Атомиздат, 1962.
5. Кантор С. А. Основы теории нейтронного каротажа. – В кн.: Прикладная геофизика. Сборник статей. Вып. 13. – М.: Гостоптехиздат, 1955. С. 3-22.
6. Филиппов Е. М. Основы теории распределения нейтронов в сильно поглощающих породах и рудах. – В кн.: Ядерная геофизика при поисках полезных ископаемых. Сборник статей / Под ред. Ф. А. Алексеева. – М.: Гостоптехиздат, 1960. С. 126-145.
7. Dunn W. L., Gardner R. P. Development of mathematical models and the dual-gange principle for surface-tupe neutron moisture content ganges. – Nuclear Engineering and Design, 1975, t. 32. №3. P. 438-448.