

2. В.А. Баранов, А.С. Чекалин. Система цифрового томосинтеза для неразрушающего контроля, —Дефектоскопия, 1988. №5. С. 30-36.

3. E. V. Moskvitin. Modeling of formation of an X-ray image behind a multilayered object. — The eighth International Scientific and Practical Conference of Students, Post-graduates and Young Scientist “Modern Techniques and Technology” (MTT 2002), Tomsk, Tomsk Polytechnic University, 2002.

УДК: 543.812:539.123

Ю.А.ВОЛЧЕНКО

РАДИОИЗОТОПНЫЙ МЕТОД ЭКСПРЕССНОГО НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ КЕРНА НЕФТЕНОСНЫХ ПОРОД

Оценка запасов нефтяных месторождений производится по результатам анализа большого количества керна, поднятого из разведочных скважин. Процесс получения информации о пористости керна и массовой доли нефти в порах керна включает несколько разнородных операций: парафинирование и упаковка керна, вывоз его с разведочных скважин авиатранспортом или автотранспортом, определение водонасыщенности и нефтенасыщенности керна методом центрифугирования и экстрагирования и плотности скелета керна термогравиметрическим методом. Производительность этого анализа (1 анализ за 12 часов) не удовлетворяет нужды практики, а проводить его можно только в базовых лабораториях, расположенных далеко от разведочных скважин [1].

В то же время существуют переносные гамма-плотномеры и нейтронные влагомеры, которые успешно применяются для экспрессного определения плотности и влажности почвогрунтов, а также при геофизических исследованиях нефтяных и газовых скважин [2, 3]. Но применить их для анализа керна нефтеносных пород невозможно, так как для их правильной работы нужны объемы пород в 100 раз больше, чем объем самого керна.

Если определение плотности керна по методу «узкого пучка» гамма-излучения изотопного источника типа Цезий-137 не представляет в теоретическом и практическом плане большой сложности [3, 4], то определение общего количества нефти и пластовой воды в порах керна, а тем более определение доли нефти в общем количестве флюида с помощью гамма-излучения невозможно, хотя возможно с помощью нейтронного излучения.

Использование нейтронного излучения для решения этой задачи потребовало значительных теоретических и экспериментальных исследований. Дело в том, что с точки зрения теории переноса нейтронов керна нефтеносных пород является таким объектом контроля, геометрические размеры которого сравнимы с длиной свободного пробега нейтронов источника, что приводит к существенным математическим трудностям при построении физико-математической модели переноса нейтронов в кернах нефтеносных пород. Определение общего количества флюида в порах керна является одной из влагометрических задач, которая должна ответить на такие вопросы: какой взять источник нейтронов для данного типа детектора нейтронов, как взаимно расположить источник нейтронов, керна и детектор нейтронов, чтобы получить необходимые экспрессность и точность при определении общего количества нефти и пластовой воды в порах конкретного керна.

Для этого можно использовать разработанную автором и подробно описанную в работе [5] многогрупповую диффузионно-возрастную теорию нейтронной влагометрии проб неорганических материалов произвольного химсостава. В ней эффективность

нейтронного влагомера оценивается по относительно-абсолютной чувствительности, предложенной в работе [2] и имеющий вид:

$$\eta = \Delta \Pi / \Pi_0 \cdot \Delta W, \quad (1)$$

где Π_0 – показание детектора нейтронов при минимальной массовой доле влаги W_0 ,

$\Delta \Pi$ – изменение показаний детектора, соответствующее изменению влажности на ΔW ,

ΔW – диапазон изменения влажности.

Показание Π детектора, регистрирующего все нейтроны с энергиями от энергии нейтронов источника до тепловой энергии, описывается формулой [5]:

$$\Pi = Q \sum_{j=J_{нач.}}^{J_k} \varepsilon_j \cdot \Delta \Psi_j, \quad (2)$$

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 [5]:

$$\Delta \Psi_j = \beta_j \int_{\tau_{j-1}}^{\tau_j} d\tau \iint_{S_1} q(M, \tau) dS, \quad (3)$$

где $q(M, \tau)$ – плотность замедления нейтронов возраста τ от источника нейтронов, расположенного в точке M_0 , находящейся на боковой поверхности керна соосно с детектором нейтронов, расположенного на противоположной стороне керна (рис.1);

$\beta_j = \frac{1}{D_j}$; D_j – коэффициент диффузии нейтронов j -й энергетической группы.

Выражение для плотности замедления $q(M, \tau)$ в случае образца конечных размеров в виде прямоугольного параллелепипеда, в центре одной из граней которого расположен точечный изотропный источник нейтронов, а на противоположной грани соосно расположен детектор нейтронов имеет вид [5]:

$$q = Q \cdot q_x(x, \tau) \cdot q_y(y, \tau) \cdot q_z(z, \tau) \cdot e^{-\int_{\tau_{исм}}^{\tau} \alpha^2(\tau) d\tau}, \quad (4)$$

где

$$q_x(x, \tau) = \sum_{i=1}^{\infty} \sum_{m=1}^2 \frac{X_{im}(-a)}{\|X_{im}\|^2} X_{im}(x) e^{-\lambda_{im}^2 \frac{(\tau - \tau_{исм})}{a^2}},$$

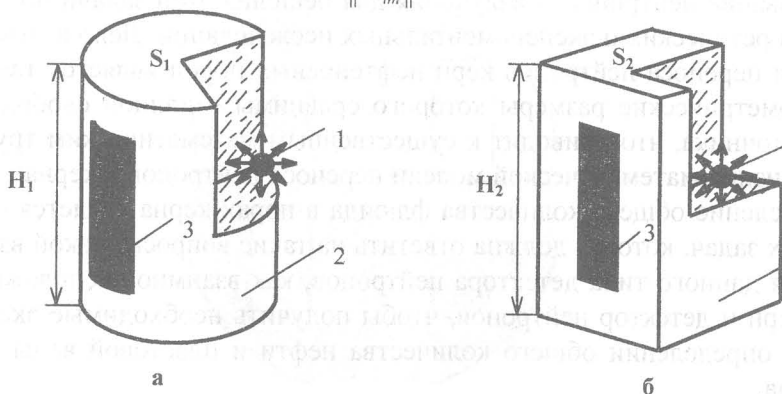


Рис. 1. Взаимное расположение источника нейтронов, керна и детектора нейтронов (а – цилиндрический керн, б – керн в форме параллелепипеда): 1 – источник нейтронов, 2 – керн, 3 – детектор нейтронов, S_1 , S_2 – торцевые поверхности керна

$$q_y(y, \tau) = \sum_{j=1}^{\infty} \frac{1}{\|Y_j\|^2} Y_j(y) e^{-\mu_j^2 \frac{(\tau - \tau_{\text{нсм}})}{b^2}}, \quad (5)$$

$$q_z(z, \tau) = \sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{\|Z_k\|^2} Z_k(z) e^{-\nu_k^2 \frac{(\tau - \tau_{\text{нсм}})}{c^2}}.$$

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:

$$\operatorname{tg} \lambda_{i1} = \frac{a}{2D\lambda_{i1}}, \operatorname{tg} \lambda_{i2} = -\frac{2D\lambda_{i2}}{a}, \operatorname{tg} \mu_j = \frac{b}{2D\mu_j}, \operatorname{tg} \nu_k = \frac{c}{2D\nu_k}; \quad (6)$$

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

$$\|X_{im}\|^2 = a \left(1 + \frac{p_a}{\lambda_{im}^2 + p_a^2} \right), \quad p_a = \frac{a}{2D}, \quad m=1,2, \quad (7)$$

$$\|Y_j\|^2 = b \left(1 + \frac{p_b}{\mu_j^2 + b^2} \right), \quad p_b = \frac{b}{2D}, \quad (8)$$

$$\|Z_k\|^2 = c \left(1 + \frac{p_c}{\nu_k^2 + c^2} \right), \quad p_c = \frac{c}{2D}. \quad (9)$$

Чтобы воспользоваться формулами (1-9) для оценки применимости нейтронного метода при определении нефтеводонасыщенности керна заменим цилиндрический керн высотой H_1 и площадью торца S_1 на прямоугольный параллелепипед высотой $H_2 \equiv H_1$ и площадью торца $S_2 \equiv S_1$ (рис.1). В этом случае объемы цилиндрического керна и керна в форме прямоугольного параллелепипеда будут тождественно равны, т.е. выводы, сделанные для керна в виде прямоугольного параллелепипеда можно будет принять и для цилиндрического керна.

На рис.2 приведены расчетные зависимости относительно-абсолютной чувствительности η от энергии нейтронов источника для песчаникового керна длиной 10см и диаметром 8см и 10см. Диаметр ^3He -детектора 3см, длина 10см. Из приведенных зависимостей видно, что при регистрации нейтронов в области энергий 0.025ЭВ÷10.5МэВ и в области энергий 0.465ЭВ÷10.5МэВ, с помощью ^3He -детектора для керна диаметром 8см оптимальная энергия нейтронов источника составляет 0.9МэВ, а для керна диаметром 10см оптимальная энергия составляет 1.0МэВ. Следовательно, для определения нефтеводонасыщенности керна диаметром 8 см и 10см нужно использовать также источники нейтронов, у которых в энергетическом спектре доля нейтронов с энергиями, лежащими в области 0.9÷1,0 МэВ максимальна. К таким источникам можно отнести радионуклидные источники нейтронов на основе Cf^{252} , Am^{241} -Be, Pu^{238} -Be.

На рис.3 приведены результаты расчетного и экспериментального сравнения результатов использования радионуклидных источников нейтронов Cf^{252} , Am^{241} -Be, Pu^{238} -Be, Pu^{239} -Be. Средние энергии нейтронов у этих радионуклидных источников равны соответственно 2.5МэВ, 3.9МэВ, 3.9МэВ, 5.0МэВ. Мощность источников нейтронов $Q=1 \cdot 10^6$ н/с. Время регистрации нейтронов $T=600$ с. Видно, что лучшие результаты дает использование источников Cf^{252} и Am^{241} -Be, имеющих более «мягкий» энергетический спектр нейтронов. Для определения нефтеводонасыщенности керна источник нейтронов Am^{241} -Be является наиболее предпочтительным, так как его период полураспада ($T=460$ лет) существенно больше периода полураспада Cf^{252} ($T=2.5$ года), что обеспечи-

дает постоянный выход нейтронов за все паспортное время (6 лет) эксплуатации источника. Сравнительно низкий уровень сопутствующего гамма-излучения также делает его наиболее приемлемым источником при одновременном определении плотности керна по методу «узкого пучка». В то же время, если постоянно вводить поправку на меняющийся выход нейтронов, то можно успешно использовать и радионуклидный источник Cf^{252} .

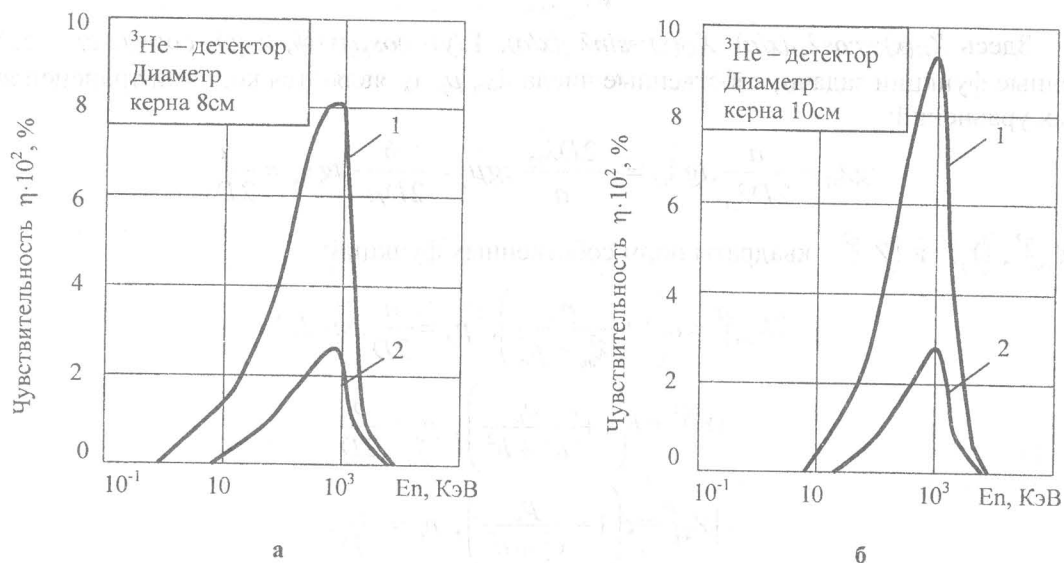


Рис.2. Зависимость чувствительности η от энергии нейтронов источника E_n для песчаникового керна длиной 10 см и диаметром 8 см (а) и 10 см (б): 1 – энергия регистрируемых нейтронов $0.025 \text{ ЭВ} \pm 10.5 \text{ МэВ}$, 2 – $0.465 \text{ ЭВ} \pm 10.5 \text{ МэВ}$

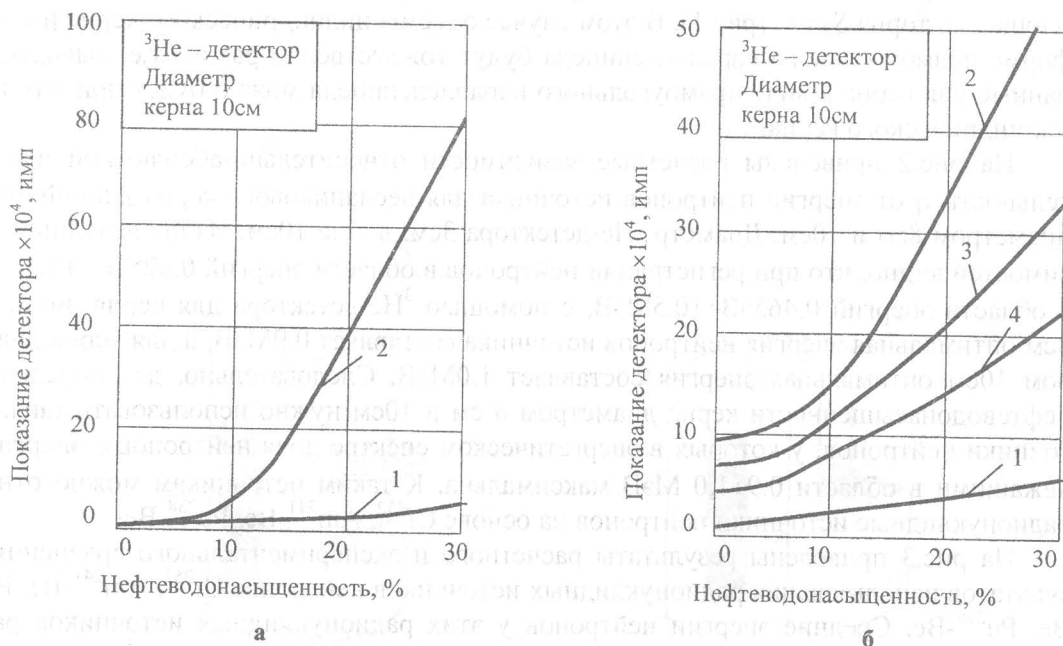


Рис.3. Расчетное (а) и экспериментальное (б) сравнение различных источников нейтронов для песчаникового керна: 1 – $\text{Pu}^{239}\text{-Be}$, 2 – Cf^{252} , 3 – $\text{Am}^{241}\text{-Be}$, 4 – $\text{Pu}^{238}\text{-B11}$

Пластовая вода, находящаяся в порах керна вместе с нефтью, всегда сильно минерализована, причем 98% солей в пластовой воде составляют соли NaCl и KCl . Так как

ядра хлора имеют достаточно большое сечение поглощения тепловых нейтронов, а минерализация пластовой воды всегда хорошо известна для каждого из месторождений благодаря гидрогеологическим исследованиям, можно использовать эффект поглощения тепловых нейтронов ядрами хлора пластовой воды при известной величине ее минерализации.

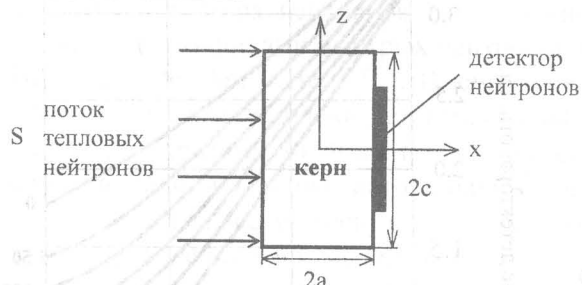


Рис.4. Схема контроля концентрации пластовой воды по ее засоленности с помощью тепловых нейтронов

Граничные условия имеют вид

$$1. \quad -D \frac{\partial \Phi}{\partial x} \Big|_{x=-a} = S; \quad 2D \frac{\partial \Phi}{\partial x} + \Phi \Big|_{x=a} = 0;$$

$$2. \quad \frac{\partial \Phi}{\partial y} \Big|_{y=0} = 0; \quad 2D \frac{\partial \Phi}{\partial y} + \Phi \Big|_{y=b} = 0;$$

$$3. \quad \frac{\partial \Phi}{\partial z} \Big|_{z=0} = 0; \quad 2D \frac{\partial \Phi}{\partial z} + \Phi \Big|_{z=c} = 0;$$

$$|x| < a, |y| < b, |z| < c. \quad (12)$$

Решая уравнение диффузии (10) с граничными условиями (11) методом разделения переменных получаем:

$$\Phi|_{x=a} = \sum_{j,k=1}^{\infty} B_{jk} \cos \mu_j \cdot \frac{y}{b} \cos \nu_k \cdot \frac{z}{c} \left[2 - \frac{2}{P_a \lambda_{jk} + 1} \right]; \quad (13)$$

$$B_{jk} = -\frac{S}{D} a \cdot b \cdot c \cdot \frac{\sin \mu_j}{\mu_j} \cdot \frac{\sin \gamma_k}{\gamma_k} \cdot \frac{1}{\|Y_j\|^2 \cdot \|Z_k\|^2} \cdot \frac{1}{\left[\left(1 - \frac{2}{P_a \lambda_{jk} + 1} \right) e^{-2\lambda_{jk}} - e^{2\lambda_{jk}} \right]}; \quad (14)$$

где μ_j, γ_k - собственные числа этой краевой задачи, $\|Y_j\|^2, \|Z_k\|^2$ - квадраты норм собственных функций этой краевой задачи, $P_a = 2D/a$.

Показание детектора нейтронов на грани ядра при $x=a$, будет иметь вид

$$\Pi = \varepsilon \int_{-b_1-c_1}^{b_1} \int_{-c_1}^{c_1} \Phi|_{x=a} \cdot dydz = 4\varepsilon \sum_{j,k=1}^{\infty} B_{jk} \cdot \frac{b}{\mu_j} \sin \mu_j \cdot \frac{b_1}{b} \cdot \frac{c}{\gamma_k} \sin \nu_k \cdot \frac{c_1}{c} \cdot \frac{2P_a \lambda_{jk}}{P_a \lambda_{jk} + 1}. \quad (15)$$

На рис. 5 приведены зависимости величины потока тепловых нейтронов от насыщенности песчаникового ядра диаметром 8см (а) и 10см (б) минерализованной пластовой водой, рассчитанные для геометрии контроля, показанной на рис. 4. Видно, что величина ослабления потока тепловых нейтронов минерализованной пластовой водой такова, что может обеспечить определение количества пластовой воды в порах ядра при известной степени минерализации последней с абсолютной погрешностью не хуже

$\pm 1.0\%$ в диапазоне $(5 \div 30)\%$, если обеспечить относительную погрешность измерения величины потока тепловых нейтронов не хуже $\pm 2.0\%$.

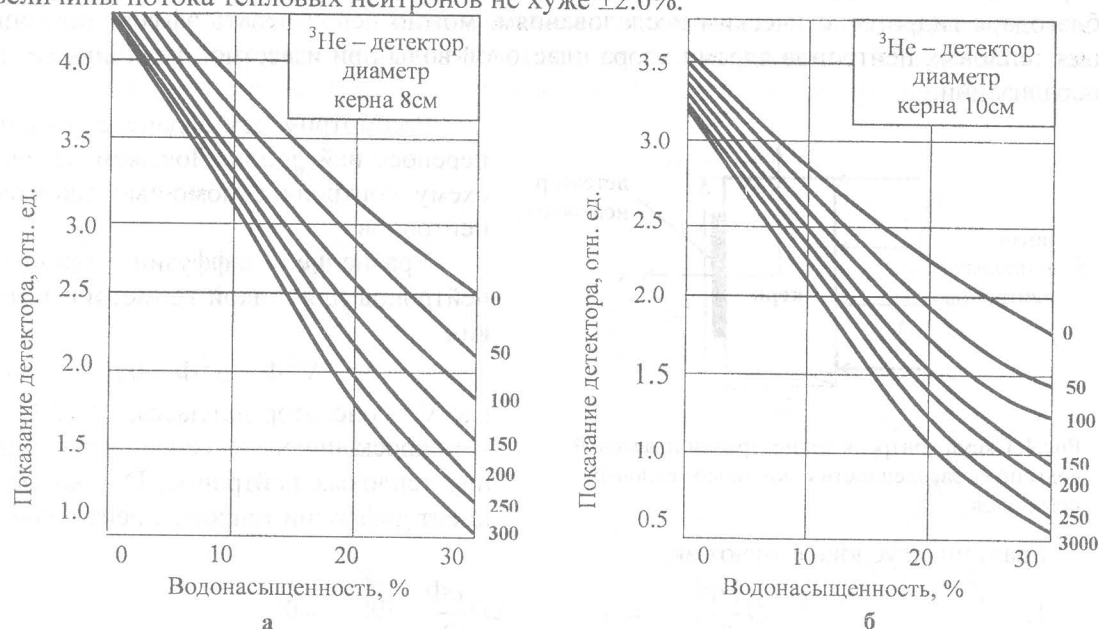


Рис.5. Зависимость величины потока тепловых нейтронов от водонасыщенности для песчаникового керна длиной 15 см и диаметром 8 см (а) и 10 см (б). Расчет: цифры у кривых – минерализация пластовой воды в г/л

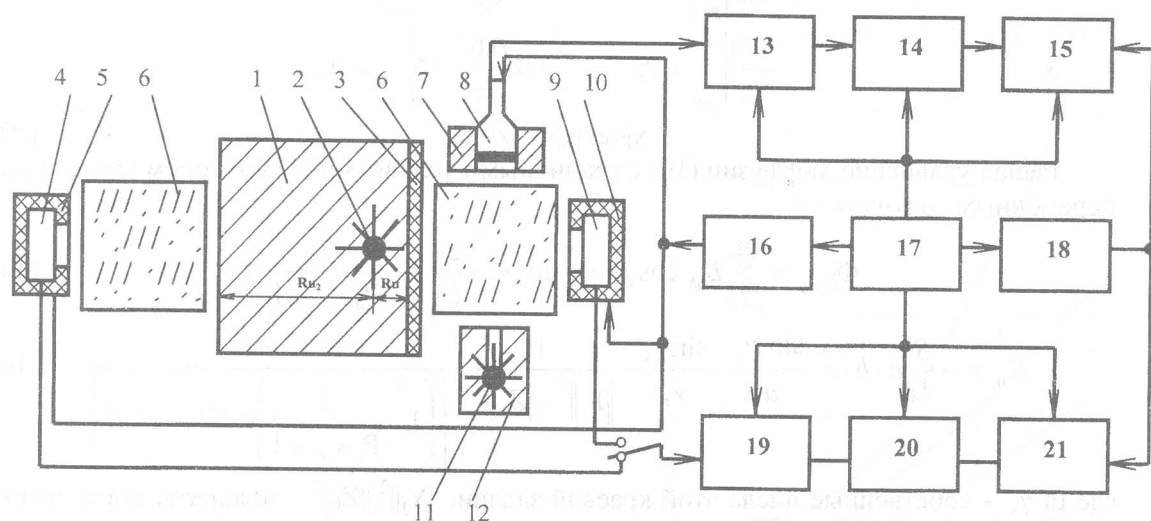


Рис. 6. Схема измерительной установки для экспериментального исследования переноса нейтронов и гамма-квантов в пробах конечных размеров, моделирующих керны нефтеносных пород: 1 – водородосодержащий замедлитель, 2 – радионуклидный источник нейтронов, 3 – поглощающий нейтроны экран, 4 – детектор медленных нейтронов, 5 – поглощающий нейтроны экран на детекторе, 6 – проба материалов, 7 – свинцовый защитный экран, 8 – спектрометрический детектор гамма-квантов, 9 – детектор медленных или быстрых нейтронов, 10 – поглощающий нейтроны экран на детекторе, 11 – радионуклидный источник гамма-квантов, 12 – свинцовый коллиматор, 13 – линейный усилитель импульсов, 14 – дифференциальный дискриминатор, 15 – цифровой индикатор с дешифратором, 16 – источник питания детекторов, 17 – источник низковольтного питания, 18 – таймер, 19 – линейный усилитель импульсов, 20 – дифференциальный дискриминатор, 21 – цифровой индикатор с дешифратором, 22 – переключатель детекторов нейтронов, Ru_1 – расстояние «источник нейтронов – поглощающий экран», Ru_2 – расстояние «источник нейтронов – левая грань замедлителя»

Для проведения экспериментальных исследований возможности экспрессного определения плотности, нефтеводонасыщенности и водонасыщенности кернов нефтеносных пород была разработана и изготовлена установка, схема которой приведена на рис.6. Через левую грань замедлителя нейтронов керн облучается тепловыми нейтронами, а через экран 3 керн облучается быстрыми и промежуточными нейтронами. В качестве детектора нейтронов использован гелиевый счетчик медленных нейтронов СНМ-16. Источниками быстрых нейтронов являлись радионуклидные источники Pu^{239} -Be, Pu^{238} -Be, Am^{241} -Be, Cf^{252} . В качестве детекторов гамма-квантов использовались спектрометрические блоки детектирования БДЭГ2-22 и БДЭГ2-23 с монокристаллами NaJ(Tl) , габаритами $40 \times 40 \text{ мм}$ и $63 \times 63 \text{ мм}$, соответственно. Источниками гамма-квантов служили радионуклидные источники Cs^{137} и Co^{60} .

Результаты экспериментальных исследований приведены на рис.3,б и 7. Из результатов, приведенных на рис. 7,а, следует, что по поглощению тепловых нейтронов можно определить массовую долю пластовой воды в керне с абсолютной погрешностью $\pm 1.0\%$ в диапазоне $(10 \div 30)\%$ при известной степени минерализации пластовой воды. Из результатов, приведенных на рис.7,б, следует, что радионуклидный источник Cs^{137} обеспечивает абсолютную погрешность измерения плотности не хуже $\pm 0.01 \text{ г/см}^3$ в диапазоне плотности $(1.6 \div 3.2) \text{ г/см}^3$. Результаты, приведенные на рис.3,б, уже были прокомментированы выше.

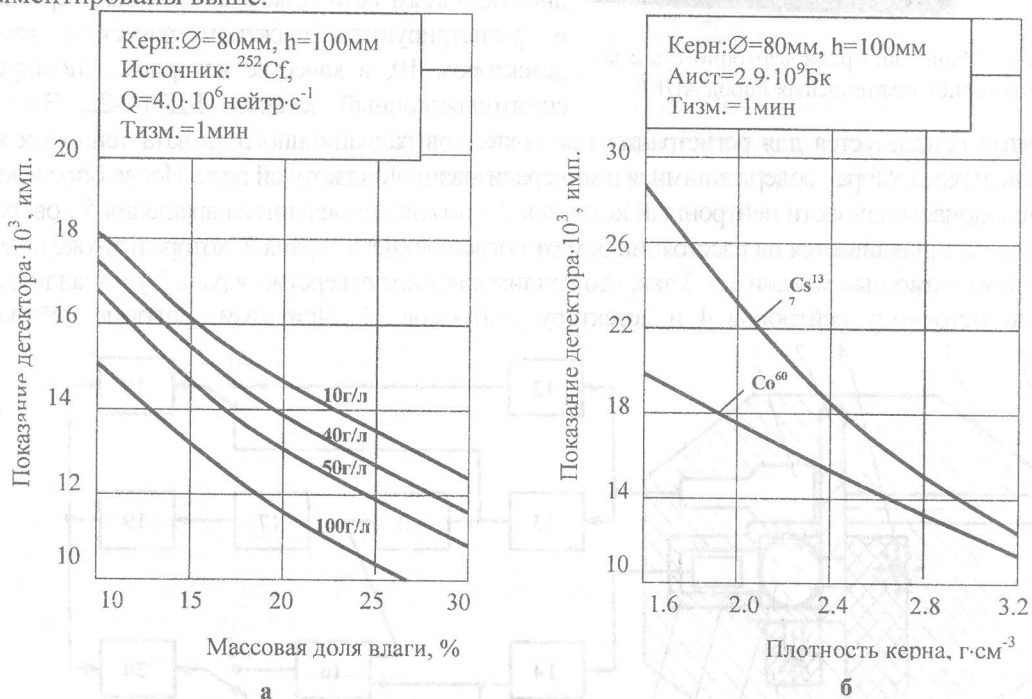


Рис.7: а – зависимость потока тепловых нейтронов от массовой доли пластовой воды для песчаникового керна. б – зависимость потока прошедших через песчаниковый керн гамма-квантов от его плотности

На базе проведенных исследований был разработан и изготовлен опытный образец радиоизотопного анализатора керна нефтеносных пород АНКР-1, общий вид которого приведен на рис.8.

Структурная схема анализатора АНКР-1 приведена на рис. 9. Отличительной особенностью этого прибора является совмещение в одном измерительном блоке метода замедления быстрых нейтронов, используемого для получения информации о нефтеводонасыщенности и метода ослабления коллимированного потока тепловых нейтронов,

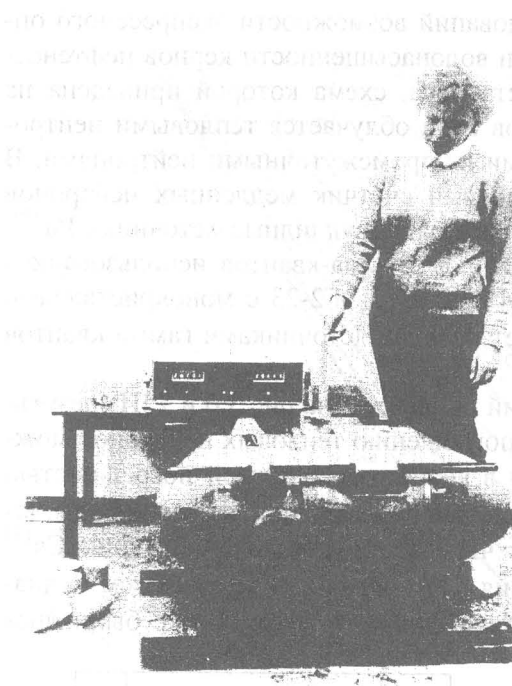


Рис. 8. Общий вид радиоизотопного анализатора ядер нефтеносных пород АНКР-1

используемого для определения водонасыщенности керна пластовой водой при известной степени минерализации последней. Анализатор работает следующим образом. Радионуклидный источник нейтронов 4 с помощью механизма вращения источника 5 устанавливается вплотную к борному, поглощающему нейтроны, экрану 2. Этот экран, в свою очередь, устанавливается в такое положение, когда коллимационное отверстие в нем разворачивается на 180° от оси «источник нейтронов 4 – детектор нейтронов 11», вращаясь вокруг горизонтальной оси механизма вращения 3 экрана 2. Нейтроны, излучаемые источником 4, через экран 2 облучают керна 9. Замедлившись в кернах нейтроны регистрируются детектором медленных нейтронов 11, в качестве которого используется гелиевый газоразрядный счетчик СНМ-16. Гамма-кванты, испускаемые радионуклидным источником 8, проходят через керна и регистрируются спектрометрическим гамма-детектором 10, в качестве которого используется сцинтилляционный детектор БДЭГ2-22. Этот же

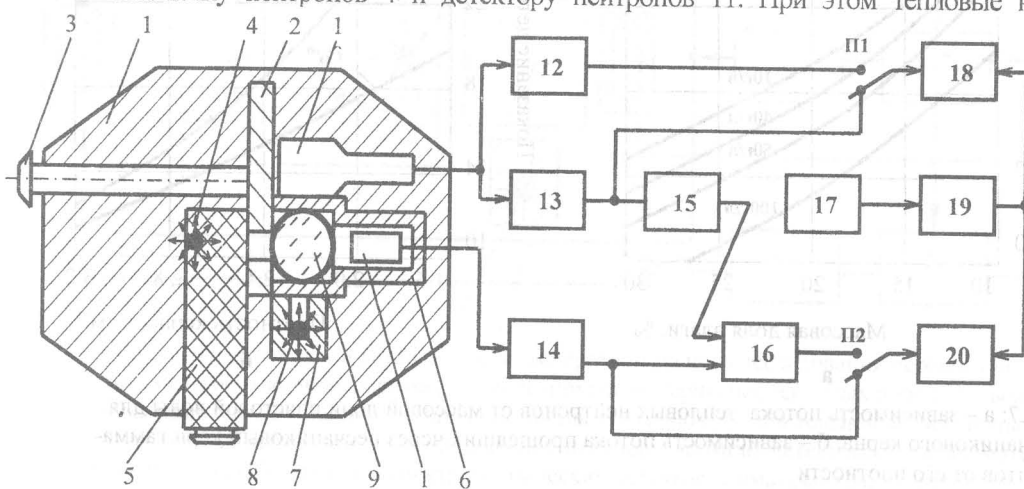


Рис. 9. Структурная схема анализатора нефтяного керна АНКР-1: 1 – парафиновая защита-замедлитель. 2 – вращающийся борный экран. 3 – механизм вращения экрана. 4 – радионуклидный источник нейтронов. 5 – механизм вращения источника. 6 – неподвижный борный экран. 7 – свинцовый коллиматор. 8 – радионуклидный источник гамма-квантов. 9 – керна. 10 – детектор гамма-квантов. 11 – детектор нейтронов. 12, 13, 14 – импульсные дифференциальные усилители. 15 – делитель частоты. 16 – сумматор импульсных потоков. 17 – таймер. 18, 20 – счетчики импульсов с цифровыми индикаторами. 19 – блок управления. П1 – переключатель каналов измерения плотности керна и минерализации пробы пластовой воды. П2 – переключатель каналов измерения нефтewодонасыщенности и водонасыщенности керна

образовавшиеся за счет замедления в водородосодержащем замедлителе 1, облучают керн через коллимационное отверстие экрана 2, проходя через керн ослабляются и регистрируются детектором 11. По степени ослабления потока тепловых нейтронов судят о водонасыщенности керна пластовой водой, минерализация которой заранее известна. Нефтеводонасыщенность определяют по величине суммарного потока медленных нейтронов и гамма-квантов радиационного захвата тепловых нейтронов ядрами хлора, содержащегося, главным образом, в пластовой воде. Переключатель П2, установленный на лицевой панели централи, при этом ставят в положение НЕФТЕВОДОНАСЫЩЕННОСТЬ. Для определения водонасыщенности переключатель П2 устанавливают в положение ВОДОНАСЫЩЕННОСТЬ. Плотность керна определяют, установив переключатель П1 в положение ПЛОТНОСТЬ, а минерализацию пробы воды определяют, установив переключатель П1 в положение МИНЕРАЛИЗАЦИЯ. Дифференциальные усилители 12 и 13 выделяют из общего импульсного потока на выходе детектора 10 импульсы, обусловленные регистрацией гамма-квантов источника 137 цезий и гамма-квантов радиационного захвата тепловых нейтронов ядрами хлора пластовой воды. Дифференциальный усилитель 14 выделяет из импульсного потока на выходе детектора 11 импульсы, обусловленные регистрацией нейтронов. Делитель частоты 15 используется для согласования импульсных потоков с выходов усилителей 13 и 14 по частоте. С помощью сумматора 16 эти импульсные потоки складываются, после чего регистрируются счетчиком 20. С помощью счетчика импульсов 18 регистрируются импульсные потоки, поступающие с выходов схем 12 или 13. Счетчики 18 и 20 снабжены цифровыми индикаторами. Блок управления 19 управляет работой счетчиков 18 и 20. С помощью таймера 17 задается необходимое время измерения, которое может меняться от 1 секунды до 999 секунд. Принцип действия и конструкция анализатора защищены патентом Российской Федерации №2008656 [6]. В табл. 1 приведены основные технические характеристики опытного образца анализатора кернов нефтеносных пород АНКР-1.

Таблица 1

Основные технические характеристики анализатора кернов АНКР-1

Наименование характеристики		Значение
Диаметр, высота керна, мм		80 (100)
Минерализация пластовой воды, г/л		10-50
Диапазон измерения нефтеводонасыщенности, %		10-30
Основная погрешность (абсолютная), %		не хуже ± 1.5
Диапазон измерения водонасыщенности, %		10-30
Основная погрешность (абсолютная), %		не хуже ± 2.5
Диапазон измерения плотности керна, г/см. ³		1.8-3.0
Основная погрешность, г/см ³		0.02
Диапазон измерения минерализации пробы пластовой воды, г/л		10-50
Основная погрешность, г/л		не хуже ± 2.0
Объем пробы воды, л		1.0
Выход нейтронов источника 252-калифорний, нейтр/с		не более 10^7
Активность источника 137-цезий, Бк		не более $6 \cdot 10^9$
Интервал рабочих температур, °С		10-30
Время, затрачиваемое на анализ первого керна, мин		не больше 20
Габаритные размеры, мм	измерительного блока	960×580×580
	централи (пульта)	500×300×170
Масса, кг	измерительного блока	80
	централи (пульта)	8
Напряжение питания от сети переменного тока напряжением 220±22В и частотой 50±0,5Гц		
Конструкция измерительного блока анализатора обеспечивает радиационную безопасность для обслуживающего персонала в соответствии с п.п. 5.8-5.9 ОСП-72/80		

Опытный образец анализатора кернов нефтеносных пород АНКР-1 был передан в эксплуатацию «Комплексной тематической экспедиции ПГО «Томскнефтегазгеология» в 1988 году. С учетом замечаний, возникших в процессе эксплуатации анализатора АНКР-1 (большой вес измерительного блока, недостаточная точность каналов измерения плотности и количества пластовой воды и др.) в период с 1990 по 1995 гг. был разработан усовершенствованный анализатор кернов нефтеносных пород АНКР-2М, общий вид которого приведен на Рис. 9. Главное отличие анализатора АНКР-2М от анализатора АНКР-1 заключается в том, что: 1 – вертикальная установка анализируемого керна заменена на горизонтальную, при которой происходит автоматическое центрирование керна относительно коллимационных отверстий блока источника и блока детектирования за счет силы тяжести; 2 – для определения нефтеводонасыщенности и водонасыщенности керна используются разные полости измерительного блока; 3 – пульт анализатора АНКР-2М содержит встроенный микропроцессор КР580БМ80 с программным обеспечением на языке АССЕМБЛЕР; 4 – вес измерительного блока анализатора уменьшен до 45 кг; 5 – контейнер для установки керна содержит биологическую защиту для руки оператора от нейтронного излучения.

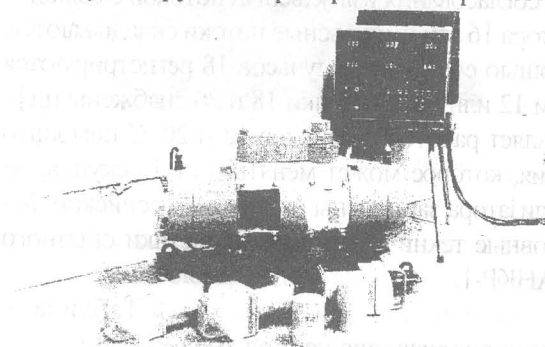


Рис.10. Общий вид анализатора (влагомера - концентратомера) кернов нефтеносных пород АНКР-2М

На Рис. 10 показана конструкция измерительного блока анализатора АНКР-2М. В качестве источника нейтронов применен радионуклидный источник Cf^{252} . В качестве источника гамма-квантов применен радионуклидный источник Cs^{137} . Детектором медленных нейтронов служит газоразрядный гелиевый счетчик СНМ-56, в качестве детектора гамма-квантов служит телескоп из семи газоразрядных счетчиков СБМ-20. Конструкция измерительного блока анализатора АНКР-2М защищена патентом Российской Федерации №2114418 [7]. Внутренний диаметр D коллиматора детектора

гамма-квантов определяется соотношением [7]:

$$D = 2L \cdot \frac{d}{l}, \quad (16)$$

где L – расстояние от источника гамма-квантов до детектора гамма-квантов; d – диаметр коллиматора источника гамма-квантов; l – длина коллимационного канала коллиматора источника гамма-квантов.

На рис. 11 приведена конструкция кернадержателя. Анализатор АНКР-2М работает следующим образом. Анализируемый керн 6 устанавливают в цилиндрический контейнер 5, соответствующий его типоразмеру, закрепляют днище 1 и крышку 8 и устанавливают кернадержатель в полость 4 замедлительного блока 1, вплотную к облицовке 7 которой расположен источник 8 быстрых нейтронов так, чтобы продольная ось контейнера была горизонтальной и перпендикулярна оси, проходящей через центры источника гамма-квантов 11, детектора гамма-квантов 13 и контейнера 16 кернадержателя 5. При этом керн 6 самоцентрируется относительно оси, проходящей через центры источника гамма-квантов и детектора гамма-квантов. Гамма-кванты источника 11 проходят через анализируемый керн 6, ослабляются материалом керна и регистрируются детектором гамма-квантов 13. Быстрые нейтроны, испускаемые источником быстрых нейтронов 8, проходят через облицовку 7 полости 4, практически не ослабляясь, замедляются на ядрах водорода водородсодержащей жидкости (пластовая вода, нефть),

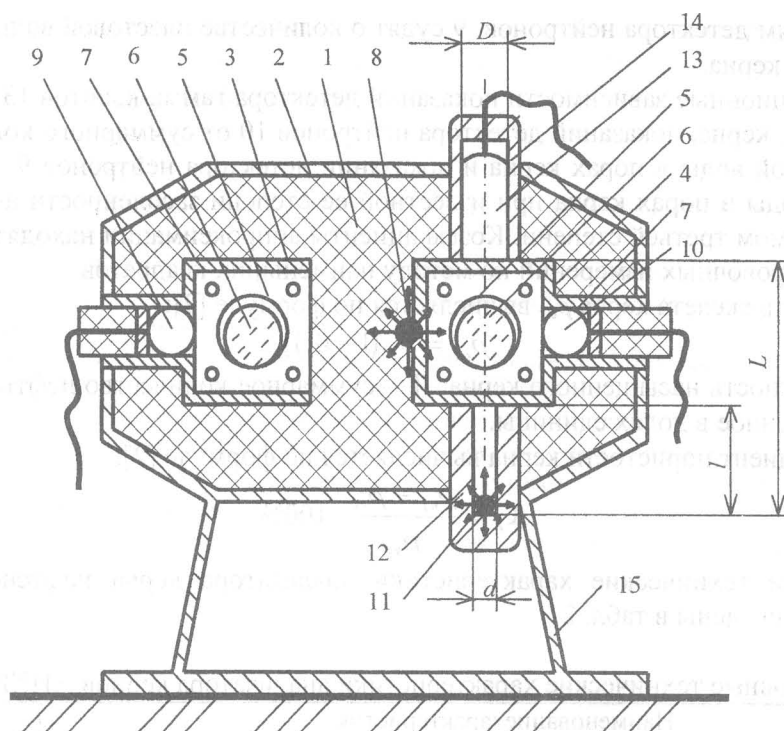


Рис. 10. Конструкция измерительного блока анализатора кернов АНКР-2М: 1 – замедлительный блок из водородосодержащего материала (парафина); 2 – корпус; 3, 4 – полости для установки кернодержателя; 5 – кернодержатель; 6 – керн; 7 – материал, поглощающий медленные нейтроны (карбид бора); 8 – изотопный источник быстрых нейтронов; 9, 10 – детектор медленных нейтронов; 11 – изотопный источник гамма-квантов; 12 – свинцовый коллиматор; 13 – детектор гамма-квантов; 14 – свинцовый коллиматор; 15 – основание; d , l – диаметр и длина коллиматора источника гамма-квантов; D – диаметр коллиматора детектора гамма-квантов; L – расстояние между источником и детектором гамма-квантов

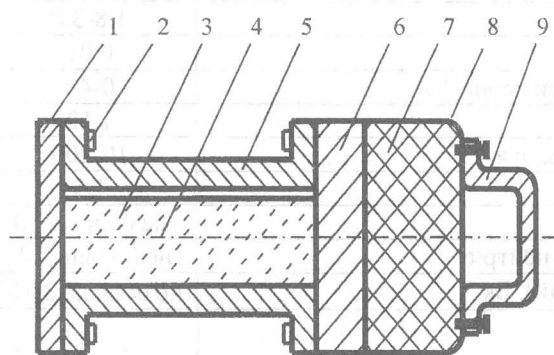


Рис. 12. Конструкция кернодержателя анализатора АНКР-2М: 1 – днище; 2 – болтовое соединение; 3 – керн; 4 – продольная ось; 5 – цилиндрический корпус; 6 – слой материала, поглощающего медленные нейтроны (карбид бора); 7 – водородосодержащий материал (полиэтилен); 8 – крышка; 9 – ручка кернодержателя

содержащейся в порах керна 6 и регистрируются детектором медленных нейтронов 10. После окончания регистрации гамма-квантов и нейтронов кернодержатель 5 вынимают из полости 4 и размещают в полости 3, у которой облицовка отсутствует со стороны, обращенной к источнику быстрых нейтронов 8. Быстрые нейтроны источника 8 замедляются в материале замедлительного блока 1 до тепловых энергий, и тепловые нейтроны проходят через анализируемый керн, ослабляются в нем и регистрируются детектором нейтронов 9.

По показаниям детектора гамма-квантов 13 судят о плотности насыщенного керна. По показаниям детектора нейтронов 10 судят о суммарном количестве водородсодержащих жидкостей (пластовая вода, нефть), находящихся в порах керна 6. По полученным значениям плотности и суммарного количества водородсодержащих жидкостей вычисляют плотность скелета и коэффициент пористости данного керна 6.

По показаниям детектора нейтронов 9 судят о количестве пластовой воды в порах анализируемого керна.

Корреляционные зависимости показаний детектора гамма-квантов 13 от плотности насыщенного керна, показаний детектора нейтронов 10 от суммарного количества нефти и пластовой воды в порах керна и показаний детектора нейтронов 9 от количества пластовой воды в порах керна при известной ее степени засоленности аппроксимируются полиномом третьей степени. Коэффициенты аппроксимации находятся по результатам градуировочных измерений по методу наименьших квадратов.

Плотность скелета керна $\rho_{ск}$ вычисляется по формуле [2]:

$$\rho_{ск} = \rho_{вл} (1 - W), \tag{17}$$

где $\rho_{вл}$ – плотность насыщенного керна; W – суммарное количество нефти и пластовой воды, выраженное в долях единицы.

Коэффициент пористости керна вычисляется по формуле [2]:

$$K_n = \frac{\rho_{вл} - \rho_{ск}}{\rho_{вл}} \cdot 100\%. \tag{18}$$

Основные технические характеристики анализатора керна нефтеносных пород АНКР-2М приведены в табл. 2.

Таблица 2

Основные технические характеристики анализатора кернов АНКР-2М

Наименование характеристик	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	
измерительного блока	не больше 45
пульта	не больше 8
Питание от сети переменного тока напряжением 220 ±22В и частотой 50±0,5Гц	

Таким образом, разработанный нами и реализованный в анализаторе АНКР-2М радиоизотопный метод экспрессного анализа кернов нефтеносных пород позволяет определять плотность насыщенного керна, плотность скелета керна, коэффициент пористости керна, а также количество нефти и пластовой воды в порах керна с точностью, удовлетворяющей нужды практики. При этом производительность анализа керна увеличивается в 30 раз и более. Отличительной особенностью анализатора керна АНКР-2М является то, что с его помощью можно анализировать керн не только в условиях базовых лабораторий, но и непосредственно на разведочной скважине. После всесто-

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-