

PACS: 28.20.Fc, 06.90.+v

NEUTRON-ABSORBING METHOD FOR CONCENTRATIONS MEASURING OF A BORON-10 ISOTOPE IN WATER SOLUTION OF BORIC ACID AND WATER SOLUTION OF BORIC ACID

A.N. Orobinskiy

National Scientific Centre «Institute of Metrology»

42, Mironosickaya Str., Kharkov, 61002, Ukraine

E-mail: orobin@mail.ru

Received November 20, 2013

Formulas for the concentrations calculation of a boron-10 isotope and boric acid in water solution; the equation of concentration measurements, dependences of concentration on quantity of atoms of a boron-10 isotope were received; the analysis of these dependences was made. Formulas for calculation of an error of the analyzer of solution neutron are given.

KEY WORDS: boron-10 isotope, boric acid, atomic fraction, molar mass, amount of atoms, concentration of boron-10 isotope in water solution of boric acid, concentration of boric acid in water solution, neutron analyzer of solution

ВИМІРЮВАННЯ КОНЦЕНТРАЦІЙ ІЗОТОПУ БОР-10 ТА БОРНОЇ КИСЛОТИ У ВОДНИХ РОЗЧИНАХ НЕЙТРОННО-АБСОРБЦІЙНИМ МЕТОДОМ

А.М. Оробінський

Національний науковий центр «Інститут метрології»

вул. Мירוносицька 42, м. Харків, 61002, Україна

Отримано формули для розрахунку концентрацій ізоотопу бор-10 та борної кислоти у водному розчині, рівняння для вимірювання концентрацій, залежність концентрацій від кількості атомів ізоотопу бор-10, виконано аналіз цих залежностей. Наведено формули для розрахунку похибки нейтронного аналізатора розчину.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: ізоотоп бор-10, борна кислота, атомна частка, молярна маса, кількість атомів, концентрація ізоотопу бор-10 у водному розчині борної кислоти, концентрація борної кислоти у водному розчині, нейтронний аналізатор розчину

ИЗМЕРЕНИЕ КОНЦЕНТРАЦИЙ ИЗОТОПА БОР-10 И БОРНОЙ КИСЛОТЫ В ВОДНОМ РАСТВОРЕ НЕЙТРОННО-АБСОРБЦИОННЫМ МЕТОДОМ

А.Н. Оробинский

Национальный научный центр «Институт метрологии»

ул. Мироносицкая 42, г. Харьков, 61002, Украина

Получены формулы для расчета концентраций изоотопа бор-10 и борной кислоты в водном растворе, уравнения измерений концентраций, зависимости концентраций от количества атомов изоотопа бор-10, выполнен анализ этих зависимостей. Приведены формулы для расчета погрешности нейтронного анализатора раствора.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: изоотоп бор-10, борная кислота, атомная доля, молярная масса, количество атомов, концентрация изоотопа бор-10 в водном растворе борной кислоты, концентрация борной кислоты в водном растворе, нейтронный анализатор раствора

Для обеспечения ядерной безопасности атомных станций (АС) в контурах систем аварийного охлаждения активной зоны ядерного реактора применяют водный раствор борной кислоты, что позволяет компенсировать запас реактивности реактора, который необходим для поддержания реактора в критическом состоянии, что обеспечивает его работу на постоянном уровне мощности в течение всей кампании. При этом очень сильное влияние борной кислоты на реактивность позволяет использовать изменение её концентрации в нескольких системах безопасности, которые способны вводить в теплоноситель первого контура большие объёмы воды с высокой концентрацией борной кислоты для прекращения цепной реакции. Для компенсации выгорания ядерного топлива во время кампании концентрация борной кислоты плавно уменьшается путем водообмена.

При измерении концентраций изоотопа бор-10 в водном растворе борной кислоты и борной кислоты в водном растворе применяют нейтронно-абсорбционный метод, который хорошо известен [1–4]. Но, несмотря на это, в литературе очень мало информации об измерении концентраций: не приведены формулы для расчета концентраций, зависимости концентраций от количества атомов изоотопа бор-10, уравнения измерений концентраций, не определена погрешность нейтронного анализатора раствора.

Цель работы – получить формулы для расчета концентраций изоотопа бор-10 в водном растворе борной кислоты и борной кислоты в водном растворе в зависимости от количества атомов изоотопа бор-10 и атомной доли изоотопа бор-10, выполнить анализ этих зависимостей; получить уравнения измерений концентраций; определить погрешность нейтронного анализатора раствора.

КОНЦЕНТРАЦИИ ИЗОТОПА БОР-10 И БОРНОЙ КИСЛОТЫ В ВОДНОМ РАСТВОРЕ

При измерении концентрации изоотопа ^{10}B в водном растворе борной кислоты ($C_{10\text{B}}$) или борной кислоты в

водном растворе ($C_{H_3BO_3}$) нейтронно-абсорбционным методом, который основан на взаимодействии (поглощение и отражение) тепловых нейтронов с атомами изотопов ^{10}B и ^{11}B , применяют нейтронные анализаторы раствора (НАР) [3,4]; для регистрации тепловых нейтронов – газоразрядные счетчики нейтронов [5].

Под концентрацией понимаем массовую долю изотопа ^{10}B или H_3BO_3 в водном растворе [6]. Сечение взаимодействия тепловых нейтронов с энергией 0,0253 эВ с атомами изотопа ^{10}B равно $\sigma_{^{10}B} = 3820,5$ барн, с атомами изотопа ^{11}B – $\sigma_{^{11}B} = 0,05$ барн [7]. Поэтому считаем, что тепловые нейтроны взаимодействуют только с атомами изотопа ^{10}B . Скорость счета импульсов на выходе НАР зависит от количества атомов ^{10}B , следовательно, зависит от $C_{^{10}B}$ или $C_{H_3BO_3}$. Чем больше атомов изотопа ^{10}B , тем больше поглощение и меньше отражение тепловых нейтронов от атомов изотопа ^{10}B , следовательно, меньше скорость счета импульсов.

Концентрации $C_{^{10}B}$ и $C_{H_3BO_3}$ равны

$$C_{^{10}B} = \frac{m_{^{10}B}}{m_{\Sigma}}, \quad C_{H_3BO_3} = \frac{m_{H_3BO_3}}{m_{\Sigma}}, \quad (1)$$

где $m_{^{10}B}$ – масса изотопа ^{10}B ; $m_{H_3BO_3}$ – масса H_3BO_3 ; $m_{\Sigma} = m_{H_3BO_3} + m_{H_2O}$ – масса раствора; m_{H_2O} – масса дистиллированной воды.

На практике пользуются физической величиной «массовая концентрация» [6], которая равна $C_V^{^{10}B} = \frac{m_{^{10}B}}{V_{\Sigma}}$ или $C_{VH_3BO_3} = \frac{m_{H_3BO_3}}{V_{\Sigma}}$, где V_{Σ} – суммарный объем раствора. Объем вследствие расширения или сжатия зависит от температуры, следовательно, $C_V^{^{10}B}$ или $C_{VH_3BO_3}$ также зависят от температуры. Поэтому корректней применять физическую величину «концентрация или массовая доля», которая не зависит от температуры.

Соотношение между $C_{VH_3BO_3}$ и $C_{H_3BO_3}$ равно $C_{VH_3BO_3} = \rho_{\Sigma} \cdot C_{H_3BO_3}$, где ρ_{Σ} – плотность водного раствора борной кислоты.

Молекула H_3BO_3 состоит из 3 атомов водорода, 3 атомов кислорода и атома бора, который имеет два изотопа: ^{10}B и ^{11}B .

Приведем молярные массы химических компонент борной кислоты. Молярная масса (M) численно равна относительной атомной массе атома (A_r) или молекулы (M_r). Размерности: $[M] = \text{г/моль}$, $[A_r] = [M_r] = \text{а.е.м.}$
 $M_B = \eta \cdot A_{r,^{10}B} + (1-\eta) \cdot A_{r,^{11}B}$, $M_{^{10}B} = \eta \cdot A_{r,^{10}B}$, $M_{^{11}B} = (1-\eta) \cdot A_{r,^{11}B}$ – молярные массы атомов бора, изотопов ^{10}B и ^{11}B , соответственно; η – атомная доля изотопа ^{10}B ; $M_{H_3BO_3} = 3 \cdot A_{rH} + 3 \cdot A_{rO} + M_B$ – молярная масса молекулы H_3BO_3 ; $A_{r,^{10}B} = 10,0129$ и $A_{r,^{11}B} = 11,0093$ – относительные атомные массы атомов ^{10}B и ^{11}B [8]; $A_{rH} = 1,00794$ и $A_{rO} = 15,9994$ – относительные атомные массы атомов водорода и кислорода [8].

С учетом значений $A_{r,^{10}B}$ и $A_{r,^{11}B}$ запишем $M_{^{10}B} = 10 \cdot \eta$, $M_{^{11}B} = 11 \cdot (1-\eta)$, $M_B = 11 - \eta$. Следовательно, $M_{H_3BO_3} = 62 - \eta$. Атомная доля (η) изотопа ^{10}B равна

$$\eta = \frac{N_{^{10}B}}{N_B} = \frac{N_{^{10}B}}{N_{^{10}B} + N_{^{11}B}}, \quad (2)$$

где N_B , $N_{^{10}B}$ и $N_{^{11}B}$ – количество атомов бора, изотопов ^{10}B и ^{11}B , соответственно.

Атомная доля изотопа ^{10}B в природном боре равна $\eta_0 = 0,198$ [9, с. 55]. Определим соотношение между $C_{^{10}B}$ и $C_{H_3BO_3}$ в водном растворе H_3BO_3 . С учетом (1) и значений $M_{H_3BO_3}$ и $M_{^{10}B}$ запишем

$$\beta = \frac{C_{H_3BO_3}}{C_{^{10}B}} = \frac{m_{H_3BO_3}}{m_{^{10}B}} = \frac{M_{H_3BO_3}}{M_{^{10}B}} = \frac{62 - \eta}{10 \cdot \eta}. \quad (3)$$

Количество атомов бора в борной кислоте с массой $m_{H_3BO_3}$ равно количеству молекул H_3BO_3 :

$N_B = N_{H_3BO_3} = \frac{N_A}{M_{H_3BO_3}} \cdot m_{H_3BO_3}$, где $N_A = 6,02214 \cdot 10^{23}$ моль⁻¹ – постоянная Авогадро. С учетом (2) количество

атомов изотопа ^{10}B представим в виде $N_{10\text{B}} = \frac{\eta \cdot N_A}{M_{\text{H}_3\text{BO}_3}} \cdot m_{\text{H}_3\text{BO}_3} = 0,1 \cdot N_A \cdot m_{10\text{B}}$, откуда найдем

$m_{10\text{B}} = \frac{10 \cdot N_{10\text{B}}}{N_A}$. Подставив $m_{10\text{B}}$ в (1) и учитывая (3), получим

$$\left. \begin{aligned} C_{10\text{B}} &= \frac{10 \cdot N_{10\text{B}}}{N_A \cdot m_{\Sigma}} \\ C_{\text{H}_3\text{BO}_3} &= \frac{(62 - \eta) \cdot N_{10\text{B}}}{\eta \cdot N_A \cdot m_{\Sigma}} \end{aligned} \right\}, \quad (4)$$

где размерность концентраций $[C] = \frac{\text{кг}^2}{\text{кг}^2} = \frac{\text{г}}{\text{г}}$, если $[m_{\Sigma}] = \text{г}$.

На АС с реакторами типа ВВЭР в системах борного регулирования диапазон изменения концентрации $C_{10\text{B}}$ ($C_{\text{H}_3\text{BO}_3}$) находится в диапазоне от 0 кг/кг до 0,0016 кг/кг (от 0 кг/кг до 0,05 кг/кг) или $C_{V^{10}\text{B}}$ ($C_{V\text{H}_3\text{BO}_3}$) – в диапазоне от 0 кг/м³ до 1,6 кг/м³ (от 0 кг/м³ до 50 кг/м³) [2]. Поэтому при построении зависимостей $C_{10\text{B}} = f(N_{10\text{B}})$ (рис. 1), $C_{\text{H}_3\text{BO}_3} = f(N_{10\text{B}})$ (рис. 2) и $C_{\text{H}_3\text{BO}_3} = f(\eta)$ (рис. 3) количество атомов изотопа ^{10}B выбрано таким образом, чтобы значения $C_{10\text{B}}$ и $C_{\text{H}_3\text{BO}_3}$ находились в вышеприведенных диапазонах.

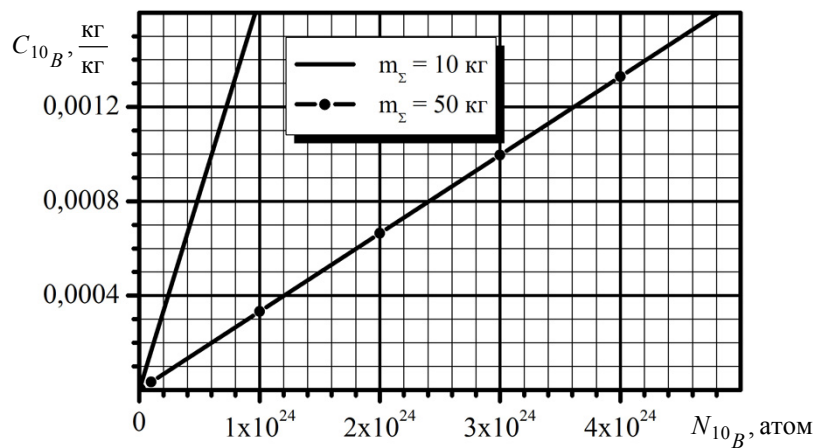


Рис. 1. Зависимости $C_{10\text{B}} = f(N_{10\text{B}})$.

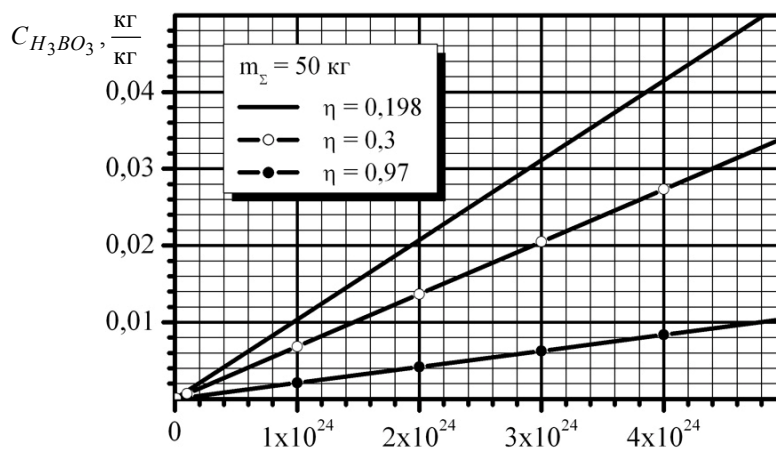


Рис. 2. Зависимости $C_{\text{H}_3\text{BO}_3} = f(N_{10\text{B}})$.

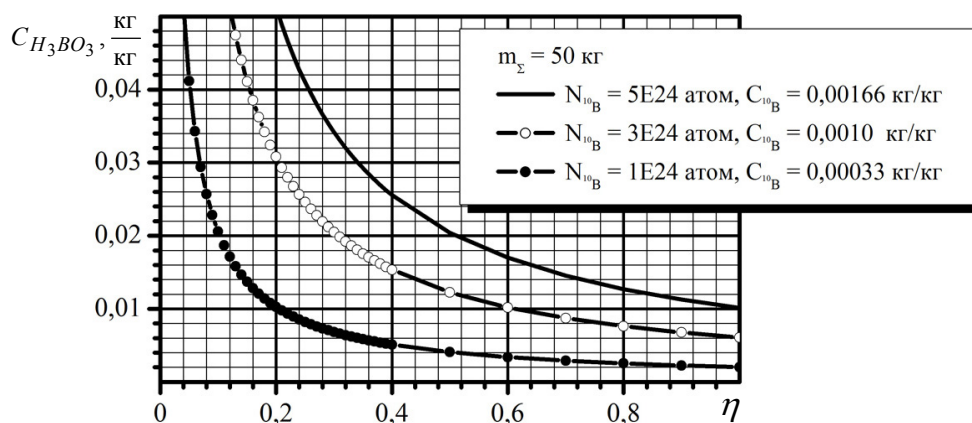


Рис. 3. Зависимости $C_{H_3BO_3} = f(\eta)$.

Выполним анализ зависимостей $C_{10B} = f(N_{10B})$ и $C_{H_3BO_3} = f(N_{10B})$. Массу раствора с учетом (3) представим в виде $m_{\Sigma} = \frac{(62 - \eta) \cdot N_{10B}}{\eta \cdot N_A} + m_{H_2O}$, где $m_{H_3BO_3} = \frac{(62 - \eta) \cdot N_{10B}}{\eta \cdot N_A}$.

1). C_{10B} и $C_{H_3BO_3}$ линейно зависят от N_{10B} и обратно пропорционально от m_{Σ} (рис. 1, рис. 2).

$$C_{10B} = f(N_{10B}) \Big|_{m_{\Sigma} = Const} = Const.$$

2). $C_{H_3BO_3}$ нелинейно зависит от η . $C_{H_3BO_3}$ уменьшается с ростом η (рис. 3), т.к. согласно (3) уменьшается

$$m_{H_3BO_3}. \text{ При } N_{10B} = Const \text{ (} K_{10B} = Const \text{) и } m_{\Sigma} = Const \text{ согласно второй формуле (4): } \frac{C_{1H_3BO_3}}{C_{2H_3BO_3}} = \frac{\eta_2 \cdot (62 - \eta_1)}{\eta_1 \cdot (62 - \eta_2)}.$$

3). N_{10B} можно изменить либо, изменяя массу H_3BO_3 при $\eta = Const$, либо применять H_3BO_3 с различными значениями η . Из (2) следует, что $N_{10B} = \frac{\eta}{1 - \eta} \cdot N_{11B}$.

4). $m_{\Sigma} = Const$ и $\eta = Const$. С ростом N_{10B} : C_{10B} и $m_{H_3BO_3}$ увеличиваются, следовательно, m_{H_2O} уменьшается.

5). $m_{\Sigma} = Const$ и $N_{10B} = Const$. С ростом η : $C_{10B} = Const$, $m_{H_3BO_3}$ уменьшаются, следовательно, m_{H_2O} увеличивается.

6). $N_{10B} = Const$ и $\eta = Const$. С ростом m_{Σ} : C_{10B} уменьшается, $m_{H_3BO_3} = Const$, следовательно, m_{H_2O} увеличивается.

7). $C_{10B} = Const$ и $\eta = Const$. С ростом N_{10B} : $m_{H_3BO_3}$ увеличивается, следовательно, $m_{H_2O} = Const$ и m_{Σ} увеличивается.

УРАВНЕНИЯ ИЗМЕРЕНИЙ C_{10B} И $C_{H_3BO_3}$

Зависимости $C_{10B} = f\left(\frac{1}{n}\right)$ или $C_{H_3BO_3} = f\left(\frac{1}{n}\right)$, где согласно (4) $C_{H_3BO_3} = \beta \cdot C_{10B}$, являются уравнениями измерений, которые аппроксимируют степенным полиномом [2], т.е.

$$C_{0j^{10B}} = a_n \cdot \left(\frac{n_{0max}}{n_{0j}}\right)^n + a_{n-1} \cdot \left(\frac{n_{0max}}{n_{0j}}\right)^{n-1} + \dots + a_1 \cdot \left(\frac{n_{0max}}{n_{0j}}\right) + a_0, \quad (5)$$

где a_i – коэффициенты полинома n-ой степени, $i = 0, 1, \dots, n$;

$j = 1, \dots, m$ – количество точек аппроксимации;

n_{0max} – максимальная скорость счета импульсов при $C_{0j^{10B}} = 0$ (дистиллированная вода);

n_{0j} – скорость счета импульсов при $C_{0j^{10B}}$.

Индекс «0» здесь и далее указывает на то, что значения $C_{0j,10B}$, n_{0max} и n_{0j} измерены при построении полинома аппроксимации $C_{0j,10B} = f(n_{0j})$.

Аппроксимацию выполним методом наименьших квадратов (МНК).

Получим систему условных уравнений

$$\begin{cases} C_{01} = a_n \cdot x_{01}^n + a_{n-1} \cdot x_{01}^{n-1} + \dots + a_1 \cdot x_{01} + a_0 \\ C_{02} = a_n \cdot x_{02}^n + a_{n-1} \cdot x_{02}^{n-1} + \dots + a_1 \cdot x_{02} + a_0 \\ \dots \\ C_{0m} = a_n \cdot x_{0m}^m + a_{n-1} \cdot x_{0m}^{n-1} + \dots + a_1 \cdot x_{0m} + a_0 \end{cases}, \tag{6}$$

где $x_{0j} = \frac{n_{0max}}{n_{0j}}$; j – строка; i – столбец; $C_{0j} = C_{0j,10B}$.

Система уравнений (6) имеет одно решение, если $m > n + 1$.

Разность между эталонной концентрацией (C_{0j}) и концентрацией, рассчитанной при помощи полинома n-ой степени, представим в виде

$$\delta_j = C_{0j} - (a_n \cdot x_{0j}^n + a_{n-1} \cdot x_{0j}^{n-1} + \dots + a_1 \cdot x_{0j} + a_0).$$

Согласно МНК сумма квадратов этих разностей должна быть минимальной, т.е.

$$S = \sum_{j=1}^m \delta_j^2 = \sum_{j=1}^m (C_{0j} - a_n \cdot x_{0j}^n - a_{n-1} \cdot x_{0j}^{n-1} - \dots - a_1 \cdot x_{0j} - a_0)^2 = \min. \tag{7}$$

Выражение (7) справедливо, если $\frac{\partial S}{\partial a_i} = 0$, $i = 0, \dots, n$.

Следует отметить, чем больше m, тем S меньше.

После дифференцирования (7) и математических преобразований получим систему нормальных уравнений

$$\begin{cases} \sum_{j=1}^m C_{0j} \cdot x_{0j}^n = a_n \cdot \sum_{j=1}^m x_{0j}^{2n} + a_{n-1} \cdot \sum_{j=1}^m x_{0j}^{2n-1} + \dots + a_1 \cdot \sum_{j=1}^m x_{0j}^{n+1} + a_0 \cdot \sum_{j=1}^m x_{0j}^n \\ \sum_{j=1}^m C_{0j} \cdot x_{0j}^{n-1} = a_n \cdot \sum_{j=1}^m x_{0j}^{2n-1} + a_{n-1} \cdot \sum_{j=1}^m x_{0j}^{2n-2} + \dots + a_1 \cdot \sum_{j=1}^m x_{0j}^n + a_0 \cdot \sum_{j=1}^m x_{0j}^{n-1} \\ \dots \\ \sum_{j=1}^m C_j = a_n \cdot \sum_{j=1}^m x_{0j}^n + a_{n-1} \cdot \sum_{j=1}^m x_{0j}^{n-1} + \dots + a_1 \cdot \sum_{j=1}^m x_{0j} + m \cdot a_0 \end{cases}$$

или

$$\begin{cases} c_n = a_n \cdot b_{nn} + a_{n-1} \cdot b_{n(n-1)} + \dots + a_1 \cdot b_{n1} + a_0 \cdot b_{n0} \\ c_{n-1} = a_n \cdot b_{(n-1)n} + a_{n-1} \cdot b_{(n-1)(n-1)} + \dots + a_1 \cdot b_{(n-1)1} + a_0 \cdot b_{(n-1)0} \\ \dots \\ c_0 = a_n \cdot b_{0n} + a_{n-1} \cdot b_{0(n-1)} + \dots + a_1 \cdot b_{01} + a_0 \cdot b_{00} \end{cases}, \tag{8}$$

где $b_{hi} = \sum_{j=1}^m x_{0j}^{h+i} - hi$ – элемент; $h = 0, 1, \dots, n$ – строка; i – столбец; $b_{hi} = b_{ih}$, $b_{00} = m$; $c_h = \sum_{j=1}^m K_{0j} \cdot x_{0j}^h$.

Определитель системы уравнений (8) равен

$$D = \begin{vmatrix} b_{nn} & b_{n(n-1)} & \dots & b_{n1} & b_{n0} \\ b_{(n-1)n} & b_{(n-1)(n-1)} & \dots & b_{(n-1)1} & b_{(n-1)0} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ b_{0n} & b_{0(n-1)} & \dots & b_{01} & b_{00} \end{vmatrix}.$$

Если $D \neq 0$, система определенная, имеет одно решение. Корни выражаются формулами Крамера

$$a_n = \frac{D_n}{D}; a_{n-1} = \frac{D_{n-1}}{D}; \dots; a_1 = \frac{D_1}{D}; a_0 = \frac{D_0}{D}, \tag{9}$$

$$\text{где } D_n = \begin{vmatrix} c_n & b_{n(n-1)} & \dots & b_{n1} & b_{n0} \\ c_{n-1} & b_{(n-1)(n-1)} & \dots & b_{(n-1)1} & b_{(n-1)0} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ c_0 & b_{0(n-1)} & \dots & b_{01} & b_{00} \end{vmatrix}, \dots, D_0 = \begin{vmatrix} b_{nn} & b_{n(n-1)} & \dots & b_{n1} & c_n \\ b_{(n-1)n} & b_{(n-1)(n-1)} & \dots & b_{(n-1)1} & c_{n-1} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ b_{0n} & b_{0(n-1)} & \dots & b_{01} & c_0 \end{vmatrix}.$$

С учетом того, что $n = 4$ [2], уравнение измерений (5) представим в виде

$$C_{10B} = A_4 \cdot \left(\frac{1}{n}\right)^4 + A_3 \cdot \left(\frac{1}{n}\right)^3 + A_2 \cdot \left(\frac{1}{n}\right)^2 + A_1 \cdot \left(\frac{1}{n}\right) + A_0, \text{ где } A_i = a_i \cdot (n_{max})^i. \quad (10)$$

или

$$C_{10B} = a_4 \cdot \left(\frac{n_{max}}{n}\right)^4 + a_3 \cdot \left(\frac{n_{max}}{n}\right)^3 + a_2 \cdot \left(\frac{n_{max}}{n}\right)^2 + a_1 \cdot \left(\frac{n_{max}}{n}\right) + a_0. \quad (11)$$

Согласно [3, 4]:

$$C_{10B} = B_4 \cdot \left(\frac{B_0}{n} - 1\right)^4 + B_3 \cdot \left(\frac{B_0}{n} - 1\right)^3 + B_2 \cdot \left(\frac{B_0}{n} - 1\right)^2 + B_1 \cdot \left(\frac{B_0}{n} - 1\right). \quad (12)$$

В таблице 1 приведено соотношение между коэффициентами A_i и B_i .

Таблица 1.

Соотношение между коэффициентами A_i и B_i .

$A_0 = -B_1 + B_2 - B_3 + B_4$	$B_0 = n_{max}$
$A_1 = B_0 \cdot (B_1 - 2B_2 + 3B_3 - 4B_4)$	$B_1 = (A_1 \cdot B_0^3 + A_2 \cdot B_0^2 + 3A_3 \cdot B_0 + 4A_4) \cdot B_0^{-4}$
$A_2 = B_0^2 \cdot (B_2 - 3B_3 + 6B_4)$	$B_2 = (A_2 \cdot B_0^2 + 3A_3 \cdot B_0 + 6A_4) \cdot B_0^{-4}$
$A_3 = B_0^3 \cdot (B_3 - 4B_4)$	$B_3 = (A_3 \cdot B_0 + 4A_4) \cdot B_0^{-4}$
$A_4 = B_0^4 \cdot B_4$	$B_4 = A_4 \cdot B_0^{-4}$

Уравнения измерений C_{10B} (11) и $C_{H_3BO_3} = \beta \cdot C_{10B}$ представлены на рис. 4 и рис. 5, соответственно; значения коэффициентов a_i и n_{max} , определенные по результатам экспериментальных исследований НАР [3], приведены в таблице 2.

Уравнения измерений (11) и (12) – нормированные к n_{max} уравнения. При расчете концентраций ими пользоваться удобнее, чем (10), т.к. коэффициенты a_i и $B_i \ll A_i$.

Таблица 2.

Значения n_{max} и коэффициентов a_i .

$m_\Sigma, \text{ кг}$	$n_{max}, \text{ с}^{-1}$	$a_0, 10^{-3}, \text{ с}^{-1}$	$a_1, 10^{-3}, \text{ кг/кг}$	$a_2, 10^{-3}, \text{ кг/кг}$	$a_3, 10^{-3}, \text{ кг/кг}$	$a_4, 10^{-3}, \text{ кг/кг}$
10	3647,4	- 0,0180	- 0,54580	0,85150	- 0,42520	0,13750
50	7165,4	- 0,05255	- 0,20044	0,29005	- 0,05719	0,02013

Анализ зависимостей (рис. 4 и рис. 5) позволяет сделать выводы.

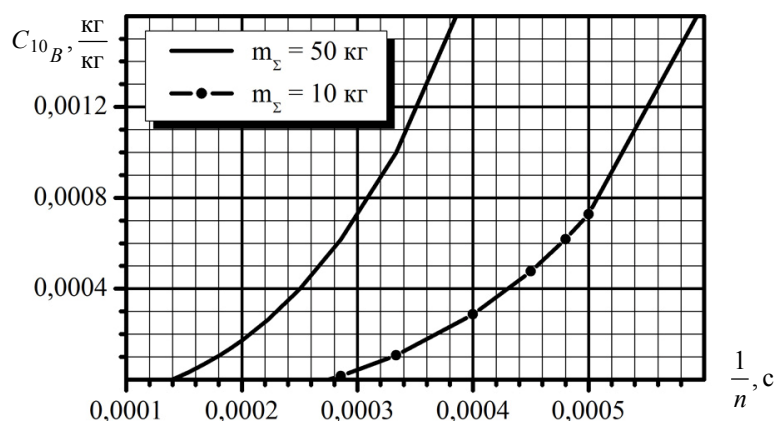
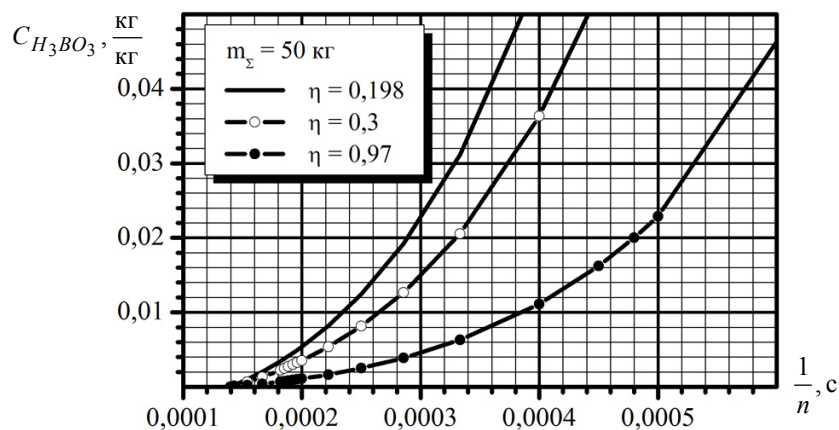
1). Скорость счета импульсов определяется N_{10B} согласно (4). N_{10B} обратно пропорционально n .

2). $C_{10B} = f\left(\frac{1}{n}\right) \Big|_{m_\Sigma = Const} = Const$ при постоянном потоке нейтронов, что следует из

$$C_{10B} = f(N_{10B}) \Big|_{m_\Sigma = Const} = Const.$$

3). Скорость счета импульсов пропорциональна m_Σ .

4). С ростом η скорость счета импульсов падает при $C_{H_3BO_3} = Const$, т.к. N_{10B} увеличивается (рис. 2).

Рис. 4. Зависимость $C_{10B} = f\left(\frac{1}{n}\right)$.Рис. 5. Зависимости $C_{H_3BO_3} = f\left(\frac{1}{n}\right)$.**ПОГРЕШНОСТИ НЕЙТРОННОГО АНАЛИЗАТОРА РАСТВОРА**

Погрешность при измерении концентрации H_3BO_3 в водном растворе должна быть, не более [10]:

- $\pm 0,0001$ кг/кг при $C_{H_3BO_3} \leq 0,01$ кг/кг;

- $\pm 1\%$ $C_{H_3BO_3} > 0,01$ кг/кг.

Следовательно, погрешность при измерении концентрации изотопа ^{10}B в водном растворе H_3BO_3 при $\eta_0 = 0,198$ ($\beta_0 = 31,21$) должна быть, не более:

- $\pm 3,2 \cdot 10^{-6}$ кг/кг при $C_{10B} \leq 3,2 \cdot 10^{-4}$ кг/кг;

- $\pm 1\%$ $C_{10B} > 3,2 \cdot 10^{-4}$ кг/кг.

Абсолютную погрешность нейтронного анализатора раствора при доверительной вероятности 0,95 представим в виде

$$\Delta C = 1,1 \cdot \sqrt{\frac{1}{3} \cdot [(\Delta_a)^2 + (\Delta_{\text{нест.}})^2 + (\Delta_0)^2]} + 2 \cdot \sigma_C,$$

где $\Delta_a = \sqrt{\sum_{j=1}^m \delta_{0j}^2} = \sqrt{\sum_{j=1}^m (C_{0j} - a_4 \cdot x_{0j}^4 - a_3 \cdot x_{0j}^3 - a_2 \cdot x_{0j}^2 - a_1 \cdot x_{0j} - a_0)^2}$ – погрешность аппроксимации с

учетом (7) при $n = 4$;

a_4, a_3, a_2, a_1 и a_0 – коэффициенты аппроксимации, рассчитанные по (9);

Δ_0 – погрешность приготовления эталонных водных растворов борной кислоты.

Среднее квадратическое отклонение (σ_C) при измерении C_{10B} ($C_{H_3BO_3}$) с учетом того, что

радиоактивный распад подчиняется распределению Пуассона, запишем в виде $\sigma_C = \sqrt{\langle N \rangle}$, где $N = n \cdot t$ – количество импульсов, измеренное за время t ; n – скорость счета импульсов при воздействии нейтронного излучения.

ВЫВОДЫ

1. Скорость счета импульсов при воздействии нейтронного излучения зависит от количества атомов изотопа бор-10 в водном растворе борной кислоты, которое определяется массой борной кислоты и атомной долей изотопа бор-10.

2. Скорость счета импульсов постоянна при постоянных значениях концентрации изотопа бор-10 в водном растворе борной кислоты, количества атомов изотопа бор-10, потока нейтронов и массы раствора.

3. При постоянной скорости счета концентрация борной кислоты в водном растворе обратно пропорционально зависит от атомной доли изотопа бор-10 при постоянной массе раствора.

4. Скорость счета импульсов пропорциональна массе раствора при постоянных значениях концентрации изотопа бор-10 в водном растворе борной кислоты или концентрации борной кислоты в водном растворе и атомной доли изотопа бор-10.

5. Погрешность нейтронного анализатора раствора определяется погрешностью аппроксимации уравнений измерений $C_{10B} = f\left(\frac{1}{n}\right)$ или $C_{H_3BO_3} = f\left(\frac{1}{n}\right)$, нестабильностью показаний, погрешностью приготовления эталонных водных растворов борной кислоты и средним квадратическим отклонением результата измерений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Fadeev Ju.G., Sychev G.A. Neйтронnye analizatory veshhestvennogo sostava dlja himicheskoj promyshlennosti. – Jaderno-fizicheskie metody analiza veshhestva. Sbornik statej. – M.: Atomizdat, 1971. – S. 304-311.
2. Krasnov B.I., Minajkin E.P., Ponomarev E.G., Chuev A.G. K voprosu vybora metodiki opredelenija soderzhanija himicheskikh jelementov i ih izotopov pri nejtronno-absorcionnom analize tehnologicheskikh produktov / GUP VNII tehnichekoj fiziki i avtomatizacii, Moskva, Nauchnaja sessija MIFI. – Sbornik nauchnyh trudov. – 2002. – T. 5: Medicinskaja fizika i tehnika, biofizika. Matematicheskoe modelirovanie v geofizike. Ohrana okruzhajushhej sredy i racional'noe prirodopol'zovanie. Teoreticheskie problemy fiziki. – S. 187-188.
3. Kalashnik Ju.S., Matjunin A.V., Orobinskij A.N. Issledovanija analizatorov rastvorov nejtronnyh / Tr. XI Mezhd. nauchn.-prakt. konf. «Sovremennye informacionnye i jelektronnye tehnologii». – Odessa. – 2010. – T. 2 – S. 74.
4. Matjunin A.V., Orobinskij A.N. Metody i sredstva izmerenij atomnoj doli izotopa bor-10 i ego koncentracii v vodnom rastvore bornoj kisloty v teplonositele pervogo kontura na AJeS s reaktorami tipa VVJeR / Tr. VII Mezhd. nauchn.-tehn. konf. «Metrologija i izmeritel'naja tehnika». – Har'kov. – 2010. – T. 2.– S. 266 – 270.
5. Malyshev E.K., Zasadych Ju.B., Stabrovskij S.A. Gazorazrjadnye detektory dlja kontrolja jadernyh reaktorov. – M.: Jenergoatomizdat, 1991. – 160 s.
6. DSTU 3651.1-97. Metrologija. Edinicy fizicheskikh velichin. Proizvodnye edinic fizicheskikh velichin Mezhdunarodnoj sistemy edinic i vnesistemnye edinicy. Osnovnye ponjatija, naimenovanija i oboznachenija. – Vved. 01.01.1999. – Kiev: Gosstandart Ukrainy. – 1998. – 76 s.
7. Izotopy: svojstva, poluchenie, primenenie. V 2 t. T. 2 / Pod red. V.Ju. Baranova. – M.: Fizmatlit, 2005 – 728 s.
8. Elemental Data Index // <http://physics.nist.gov/PhysRefData/Elements>.
9. Standard Reference Materials: Boric Acid; Isotopic and Assay Standard Reference Materials // National Bureau of Standards (U.S.). – 1970. – Special Publication 260-17. – 70 p.
10. GOST 24693-81. Reaktory jadernye jenergeticheskie korpusnye s vodoj pod davleniem. Obshhie trebovanija k sisteme bornogo regulirovanija. – Vved. 01.07.1982. – M.: Izd-vo standartov. – 1981. – 6 s. Izmenenie 1. – Vved. 01.08.1987. IUS № 6. – 1987.