

ФИЗИЧЕСКАЯ ОПТИКА

УДК 543.42.062: 539.183.2

СПЕКТРОСКОПИЧЕСКОЕ И ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЯЖЕЛОЙ ВОДЫ

© 2011 г. Т. В. Воронина*; А. А. Слободов**, доктор хим. наук

* Петербургский институт ядерной физики им. Б.П. Константинова РАН, г. Гатчина, Ленинградская область

** Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, Санкт-Петербург

E-mail: voronina@pnpi.spb.ru, aslobd@gmail.com

Проведено спектроскопическое и термодинамическое исследование тяжелой воды с целью организации корректного изотопного анализа. Проанализирована зависимость натурального показателя поглощения тяжелой воды $\alpha(\nu)$ от ее концентрации. Показано, что в общем случае эта зависимость имеет квадратичный характер с точностью до 0,1 ат.%, а при содержании в тяжелой воде одного из изотопов водорода H или D менее 1 ат.% эта зависимость становится линейной. На основе проведенного анализа экспериментально получены зависимости $\alpha(\nu)$ от концентрации тяжелой воды, которые имеют ожидаемый вид.

Ключевые слова: тяжелая вода, протий, дейтерий, инфракрасная спектроскопия.

Коды OCIS: 300.6330, 300.6390.

Поступила в редакцию 02.07.2010.

В настоящее время в ПИЯФ РАН готовится к пуску тяжеловодный исследовательский реактор ПИК (пучковый исследовательский комплекс). Его конструкция и параметры выбраны таким образом, чтобы обеспечить максимальный нейтронный поток. По проекту плотность потока тепловых нейтронов в тяжеловодном отражателе должна составить $1,2 \times 10^{15}$ н/см² с, что на порядок больше, чем на действующих сегодня исследовательских реакторах в России. Одним из необходимых условий получения такого высокого нейтронного потока является использование в качестве отражателя концентрированной тяжелой воды (по проекту концентрация D₂O должна быть не ниже, чем 99,8 ат.%). Несмотря на то что на всех тяжеловодных реакторах предпринимаются специальные меры для защиты тяжелой воды от разбавления, в процессе их эксплуатации возникает необходимость проведения различных работ, при выполнении которых происходит разгерметизация тяжеловодных контуров и, как следствие, заметное разбавление тяжеловодного теплоносителя. По литературным источникам (см., например [1])

скорость разбавления тяжелой воды в реакторах оценивается как 0,1–0,3 ат.% в год. По расчету [2] разбавление тяжелой воды в тяжеловодном отражателе реактора ПИК на 1% приводит к уменьшению потока тепловых нейтронов на 20%. Поэтому концентрация тяжелой воды является важным параметром, который необходимо контролировать. Для поддержания концентрации тяжелой воды в тяжеловодных контурах на уровне 99,8 ат.% в проекте реактора ПИК заложено создание установки изотопной очистки. В настоящее время в ПИЯФе создана опытно-промышленная установка ЭВИО¹ [3] для депротизации и детритизации тяжелой воды, разделительные характеристики которой определяются путем измерения изотопного состава воды и газа в различных точках отбора по высоте колонны.

Это потребовало параллельно вести работы по развитию изотопного анализа тяжелой воды. Для проведения такого анализа в свое время был выбран метод инфракрасной (ИК) спектроскопии благодаря его высокой чувстви-

¹ ЭВИО – электролиз воды + изотопный обмен.

тельности, быстроте, малому количеству необходимого для анализа вещества, возможности проведения измерений в потоке. Однако для корректного его применения необходимо знание химии тяжелой воды.

1. Основы количественного анализа тяжелой воды

Тяжелая вода широкого диапазона концентраций представляет собой смесь молекул H_2O , D_2O и HDO



Мольные доли изотопных модификаций тяжелой воды связывает равенство

$$[H_2O] + [D_2O] + [HDO] = 1, \quad (2)$$

а атомные доли дейтерия a_D и протия a_H соответственно

$$a_D + a_H = 1. \quad (3)$$

Константа равновесия (1) известна [4] и при 25° равна

$$k = [HDO]^2 / ([H_2O][D_2O]) = 3,80. \quad (4)$$

Если принять $[HDO] = x$, тогда из условия материального баланса

$$\begin{aligned} [D_2O] &= a_D - 0,5x, \\ [H_2O] &= a_H - 0,5x = 1 - a_D - 0,5x. \end{aligned} \quad (5)$$

Из (4) и (5) можно рассчитать равновесную концентрацию $[HDO]$

$$x = \frac{-1 + \sqrt{1 + 4a_D a_H (4 - k)/k}}{(4 - k)/k}. \quad (6)$$

Таким образом, уравнения (5) и (6) устанавливают связь между равновесными концентрациями изотопных модификаций H_2O , D_2O и HDO и содержанием дейтерия (протия) в тяжелой воде a_D (a_H).

Для того чтобы определить содержание дейтерия (протия) в тяжелой воде a_D (a_H) методом ИК-спектроскопии, экспериментально измеряют спектр пропускания образца тяжелой воды

$$T(\nu) = I(\nu)/I_0(\nu), \quad (7)$$

где $T(\nu)$ – пропускание образца тяжелой воды, $I_0(\nu)$ – интенсивность падающего света с частотой ν , $I(\nu)$ – интенсивность прошедшего сквозь слой вещества света с частотой ν .

В соответствии с законом Бугера–Ламберта–Бера интенсивности падающего и прошедшего

сквозь слой вещества толщиной d света связаны соотношением

$$I(\nu) = I_0(\nu) \exp(-\alpha(\nu)d), \quad (8)$$

где $\alpha(\nu)$ – натуральный показатель поглощения образца воды, d – толщина кюветы.

Учитывая (2), натуральный показатель поглощения α тяжелой воды можно представить как

$$\begin{aligned} \alpha(\nu) &= \varepsilon_H(\nu)[H_2O] + \varepsilon_{HD}(\nu)[HDO] + \varepsilon_D(\nu)[D_2O] = \\ &= a_D(\varepsilon_D - \varepsilon_H) + x(\varepsilon_{HD} - 0,5(\varepsilon_H + \varepsilon_D)) + \\ &\quad + \varepsilon_H = S a_D + G x + \varepsilon_H, \end{aligned} \quad (9)$$

где $S = \varepsilon_D - \varepsilon_H$, $G = \varepsilon_{HD} - 0,5(\varepsilon_H + \varepsilon_D)$, ε_D , ε_H , ε_{HD} – молярные коэффициенты поглощения соответствующих изотопных модификаций тяжелой воды на определенной длине волны [5].

В общем случае полученная зависимость $\alpha(\nu)$ от концентрации тяжелой воды a_D нелинейная. Эта зависимость становится линейной только при условии $G = 0$, т. е. $\varepsilon_{HD} = 0,5(\varepsilon_H + \varepsilon_D)$. Тогда уравнение (9) принимает вид

$$\alpha(\nu) = S a_D + \varepsilon_H. \quad (10)$$

Волновые числа ν^* , на которых выполняется это условие, получили название особых точек. Их положение на спектре тяжелой воды может быть найдено из литературных данных [6] и уточнено экспериментальным путем. Использование таких волновых чисел значительно упрощает методику изотопного анализа воды.

Кроме того, при содержании в тяжелой воде изотопа водорода H (или D) ниже 1 ат.% последний практически целиком сосредоточен в молекулах HDO . Поэтому концентрацией $[H_2O]$ (или $[D_2O]$) в выражении (9) можно пренебречь. В этом случае зависимость становится линейной:

– для области высоких концентраций тяжелой воды ($a_H < 1$ ат.%)

$$\begin{aligned} \alpha &= \varepsilon_D[D_2O] + \varepsilon_{HD}[HDO] = \\ &= 2a_H(\varepsilon_{HD} - \varepsilon_D) + \varepsilon_D = S_D a_H + \varepsilon_D, \end{aligned} \quad (11)$$

где $S_D = 2(\varepsilon_{HD} - \varepsilon_D)$;

– для области низких концентраций тяжелой воды ($a_D < 1$ ат.%)

$$\begin{aligned} \alpha &= \varepsilon_H[H_2O] + \varepsilon_{HD}[HDO] = \\ &= 2a_D(\varepsilon_{HD} - \varepsilon_H) + \varepsilon_H = S_H a_D + \varepsilon_H, \end{aligned} \quad (12)$$

где $S_H = 2(\varepsilon_{HD} - \varepsilon_H)$.

Можно показать, что в общем случае уравнение (9) с хорошей точностью может быть описано квадратичной зависимостью. Действительно, если воспользоваться тем, что в выражении (6) член $a_D a_H (4 - k)/k$ много меньше 1, и разложить $\sqrt{1 + 4a_D a_H (4 - k)/k}$ в ряд Тейлора, то в результате выражение для x можно представить в виде

$$x \approx \left[-1 + \left(1 + \frac{1}{2} 4k^* (a_D - a_D^2) - \frac{1}{8} (4k^* (a_D - a_D^2))^2 \dots \right) \right] / k^* = 2(a_D - a_D^2) - 2k^* (a_D - a_D^2)^2, \quad (13)$$

где $k^* = (4 - k)/k$.

Тогда согласно (5) равновесные концентрации изотопных модификаций составят

$$[D_2O] = (1 + k^*)(a_D)^2 - 2k^*(1 + k^*)(a_D)^3 \dots, \quad (14)$$

$$[H_2O] = 1 - (2a_D) + (1 + k^*)(a_D)^2 - 2k^*(1 + k^*)(a_D)^3 \dots \quad (15)$$

Второй член полученного для x выражения (13) по расчету составляет не более 1% от первого. Если им пренебречь, то это приводит к неточности определения a_D (a_H) не более 0,001 (0,1 ат.%). Следовательно, можно принять $x = 2(a_D - a_D^2)$. Если подставить полученное выражение для x в (9), получим

$$\alpha(\nu) = 2a_D(\epsilon_{HD} - \epsilon_D) - 2a_D^2(\epsilon_{HD} - 0,5(\epsilon_H + \epsilon_D)) + \epsilon_H. \quad (16)$$

Из (16) путем математических преобразований можно получить соотношение, которое показывает квадратичный характер зависимости a_D от $\alpha(\nu)$,

$$a_D = \frac{\alpha - \epsilon_H}{2(\epsilon_{HD} - \epsilon_H)} - \left(\frac{\epsilon_{HD} + \left(\frac{\epsilon_D + \epsilon_H}{2} \right)}{\epsilon_{HD} - \epsilon_H} \right) \left(\frac{\alpha - \epsilon_H}{2(\epsilon_{HD} - \epsilon_H)} \right)^2. \quad (17)$$

Полученные расчеты были проверены на практике сначала на ИК спектрофотометре Specord M80, а впоследствии – на ИК фурье-спектрометре Tensor 37. Результаты представлены ниже.

2. Количественный изотопный анализ тяжелой воды на Specord M80

Спектральный диапазон двухлучевого ИК спектрофотометра Specord M80 составляет 4000–400 см⁻¹. Поэтому для проведения изотопного анализа тяжелой воды на Specord M80 можно было использовать только валентные и деформационные полосы поглощения. На спектрах тяжелой воды, полученных на Specord M80, отчетливо видны три полосы поглощения, которые можно идентифицировать согласно [5–7] так, как показано в табл. 1.

2.1. Количественный изотопный анализ высококонцентрированной тяжелой воды ($a_H < 1$ ат.%)

Для анализа концентрированной тяжелой воды на содержание в ней протия была использована полоса 1 (см. табл. 1). Методический подход на Specord M80 для концентрированной тяжелой воды опирался на то, что зависимость $\alpha(\nu)$ от a_H можно считать линейной. Тогда задача сводится к определению двух коэффициентов: тангенса угла наклона прямой линии, отвечающей данной зависимости на графике, к оси

Таблица 1. Положение полос, наблюдаемых в спектре поглощения воды на Specord M80 и их интерпретация

№ полосы	ν полосы поглощения, см ⁻¹	$\nu_{\text{макс}}$, см ⁻¹	Идентификация полосы поглощения
1	3800–3000	3420 ± 10	Сумма синфазного и противофазного валентных колебаний молекулы H ₂ O и валентного колебания (OH ⁻) молекулы HDO – полоса поглощения OH
2	3170–2780	2920 ± 10	Обертон деформационного колебания молекулы HDO
3	2900–2200	2510 ± 10	Сумма синфазного и противофазного валентных колебаний молекулы D ₂ O и валентного колебания (OD ⁻) молекулы HDO – полоса поглощения OD

абсцисс; свободного члена зависимости – натурального логарифма пропускания “100%-ной тяжелой воды”. При определении тангенса угла наклона зависимости $\ln T$ от a_H была отработана процедура разбавления тяжелой воды [8]. Для определения свободного члена зависимости была использована так называемая “100%-ная тяжелая вода”, полученная на установке ЭВИО [3], позволяющей извлекать протий из тяжелой воды вплоть до достижения порога чувствительности нашего основного средства измерения.

Для устранения погрешности, связанной со старением стекол кюветы, положением кюветы в луче и др., был использован “метод базовой линии” [8]. Согласно этому методу пропускание образца тяжелой воды измеряется не только в точке максимума полосы поглощения ν_1 , но и в точках так называемой “базовой линии” (ν_2 и ν_3). Эти точки соединяют на спектре тяжелой воды и на полученной “базовой линии” находят $T_0(\nu_1) = [(T(\nu_2) + T(\nu_3))/2]$. Тогда содержание протия (дейтерия) рассчитывается по формуле

$$a_H = kD + l, \quad (18)$$

где $D = \lg(T_0(\nu_1)/T(\nu_1))$, k и l – коэффициенты калибровочной зависимости. Такая процедура приводит к компенсации всех изменений условий измерения. В результате для анализа концентрированной тяжелой воды на кювете толщиной 206 мкм с оптическими окнами из CaF_2 была получена калибровочная зависимость, позволяющая находить содержание протия при ежедневном оперативном анализе концентрированной тяжелой воды с относительной погрешностью $\pm 2\%$

$$a_H(\text{ат.}\%) = 0,0276 + 1,204D,$$

где $D = \lg[(T(3540 \text{ см}^{-1}) + T(3280 \text{ см}^{-1}))/2T(3410 \text{ см}^{-1})]$. Погрешность коэффициентов составила $0,0276 \pm 0,0006$, $1,204 \pm 0,005$. Это дало возможность разработать методику определения абсолютного содержания протия в концентрированной тяжелой воде [8], которая в 2005 году была аттестована во ФГУП “ВНИИМ им. Д.И. Менделеева” [9].

2.2. Количественный изотопный анализ низкоконцентрированной тяжелой воды ($a_D < 1 \text{ ат.}\%$)

Для анализа низкоконцентрированной тяжелой воды на содержание в ней дейтерия

была использована полоса 3. Количественный изотопный анализ тяжелой воды с низким содержанием дейтерия на Specord M80 также опирался на то, что зависимость $\alpha(\nu)$ от a_D для низкоконцентрированной тяжелой воды можно считать линейной. Для определения тангенса угла наклона зависимости были приготовлены калибровочные смеси тяжелой воды с низким содержанием дейтерия. Для этого в воду с природным содержанием дейтерия добавляли малое, точно измеренное весовым способом, количество концентрированной тяжелой воды с известным содержанием дейтерия. В данном случае для определения свободного члена зависимости можно было учесть тот факт, что природное содержание дейтерия в воде известно [4] и составляет $(0,015 \pm 0,002) \text{ ат.}\%$. Кроме того, для отработки методики была использована так называемая “100%-ная легкая вода”, полученная на установке дедейтеризации [10], позволяющей извлекать дейтерий из тяжелой воды вплоть до достижения порога чувствительности нашего основного средства измерения. В результате на кювете толщиной 122 мкм с оптическими окнами из CaF_2 для анализа воды с низким содержанием дейтерия была получена зависимость атомной доли дейтерия от величины D , позволяющая находить содержание дейтерия при оперативном анализе воды с абсолютной погрешностью $\pm 0,003 \text{ ат.}\%$ [11],

$$a_D(\text{ат.}\%) = -0,082 - 1,489D,$$

где $D = \lg(T(2500 \text{ см}^{-1})/T(2700 \text{ см}^{-1}))$. Погрешность коэффициентов составила $-0,082 \pm 0,003$, $-1,489 \pm 0,09$.

2.3. Количественный изотопный анализ тяжелой воды в широкой области концентраций

Для анализа тяжелой воды в широком диапазоне концентраций была выбрана полоса 2. Методический подход на Specord M80 в широком диапазоне концентраций также опирается на линейность зависимости, так как это значительно упрощает анализ. По литературным данным [6] было найдено значение волнового числа ν^* , на котором выполняется условие $\epsilon_{HD} = 0,5(\epsilon_H + \epsilon_D)$. Оно было уточнено экспериментальным путем на Specord M80. Таким волновым числом на спектре тяжелой воды является $\nu = 2988,8 \text{ см}^{-1}$. Для проведения измерений из образцов концентрированной тяжелой воды (концентрация которых была из-

мерена с относительной погрешностью 1%) и воды с природным содержанием дейтерия ($0,015 \pm 0,002$) ат.% весовым методом были приготовлены калибровочные растворы тяжелой воды. По полученным данным методом наименьших квадратов были построены зависимости атомной доли дейтерия от величины $D = \lg(T(2988,8 \text{ см}^{-1})/T(2777,6 \text{ см}^{-1}))$ для двух кювет:

– на кювете 61 мкм с оптическими окнами из MgF_2 (для диапазона концентраций $50 \text{ ат.}\% < a_D < 100 \text{ ат.}\%$)

$$a_D(\text{ат.}\%) = 85,88 + 39,94D,$$

погрешность коэффициентов составила $85,88 \pm 0,08$ и $39,9 \pm 0,2$;

– на кювете 41 мкм с оптическими окнами из MgF_2 (для диапазона концентраций $30 \text{ ат.}\% < a_D < 100 \text{ ат.}\%$)

$$a_D(\text{ат.}\%) = 85,67 + 59,7D,$$

погрешность коэффициентов составила $85,67 \pm 0,06$ и $59,7 \pm 0,1$.

Погрешность полученных калибровок составила $\pm 0,4 \text{ ат.}\%$.

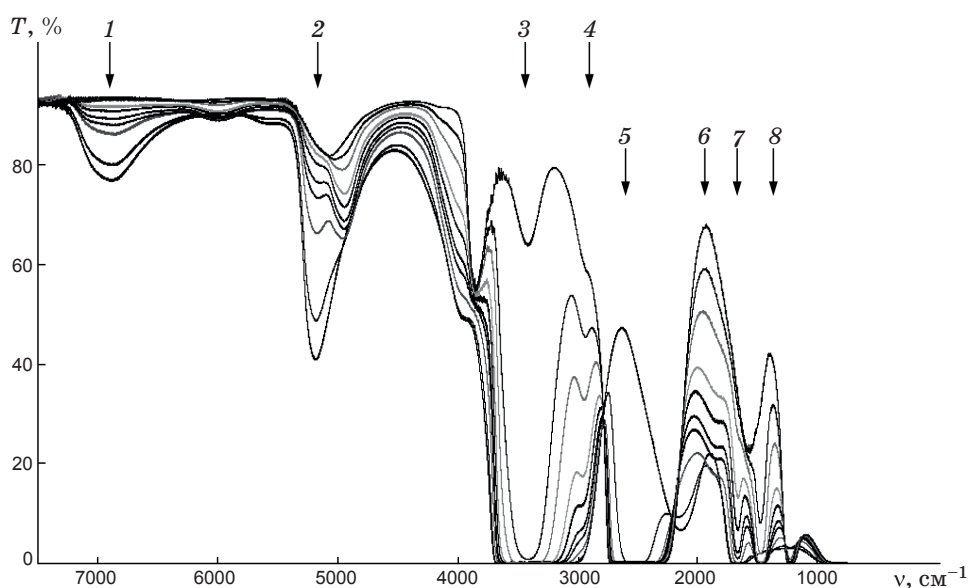
Недостатком проделанной работы было то, что на Specord M80 не удалось отработать методику, которая позволила бы анализировать тяжелую воду во всем диапазоне концентраций (от природной до высококонцентрированной тяжелой воды). К сожалению, из-за сильного

поглощения диапазон измеряемых концентраций тяжелой воды на Specord M80 составил от 30 ат.% и выше. Поэтому появление в настоящее время новых аналитических приборов, таких как ИК спектрометры с фурье-преобразованием, вызвало наш интерес.

3. Количественный изотопный анализ тяжелой воды на ИК фурье-спектрометре Tensor 37

Спектральный диапазон Tensor 37 составляет $7500\text{--}400 \text{ см}^{-1}$, поэтому для анализа тяжелой воды можно использовать не только валентные и деформационные полосы поглощения, но и их составные колебания. На ИК фурье-спектрометре Tensor 37 были получены спектры пропускания образцов тяжелой воды различной концентрации, на которых отчетливо видно несколько полос поглощения. Спектры представлены на рисунке, их интерпретация – в табл. 2.

В то время как на традиционном спектрофотометре Specord M80 полученные данные (спектры) обрабатывались вручную (поэтому было удобно использование линейных зависимостей), методический подход на Tensor 37 опирался на использование пакета программ Quant 1 для обработки полученных спектров. Калибровочные зависимости строились не от пропускания в отдельной рабочей точке спектра



Спектры пропускания калибровочных растворов тяжелой воды в широком диапазоне концентраций, измеренные на Tensor 37. Кювета $d = 60 \text{ мкм}$, фон – пустой луч, $\nu = 7500\text{--}400 \text{ см}^{-1}$. Концентрация калибровочных растворов (сверху вниз): 0,02, 12,20, 39,21, 53,51, 60,61, 71,04, 78,96, 90,61, 95,38, 99,75%.

Таблица 2. Положение полос, наблюдаемых в спектре поглощения воды на Tensor 37, и их интерпретация [5–7]

№ полосы	ν полосы поглощения, см^{-1}	$\nu_{\text{макс}}$, см^{-1}	Идентификация полосы поглощения
1	7400–6300	6910 ± 20	Составное колебание молекулы H_2O (синфазное и противофазное валентное)
2	5400–4700	5180 ± 20 4930 ± 20	Суммы составных колебаний (противофазного валентного + деформационного) молекул H_2O и HDO
3	3800–3000	3420 ± 10	Сумма синфазного и противофазного валентных колебаний молекулы H_2O и валентного колебания (OH^-) молекулы HDO – <i>полоса поглощения OH</i>
4	3170–2780	2920 ± 10	Обертон деформационного колебания молекулы HDO
5	2900–2200	2510 ± 10	Сумма синфазного и противофазного валентных колебаний молекулы D_2O и валентного колебания (OD^-) молекулы HDO – <i>полоса поглощения OD</i>
6	1750–1600	1650	Деформационное колебание молекулы H_2O
7	1550–1350	1460	Деформационное колебание молекулы HDO
8	1300–1140	1210	Деформационное колебание молекулы D_2O

(как на Specord M80), а от площади пиков соответствующих полос поглощения.

Для определения содержания протия и дейтерия в концентрированной тяжелой воде была выбрана полоса 3. На кювете толщиной 323 мкм с оптическими окнами из CaF_2 для концентрированной тяжелой воды ($a_{\text{D}} > 99$ ат.%) была получена линейная калибровочная зависимость a_{D} (ат.%) = $99,907 - 0,00249 S_{\text{пика}}$. Погрешность калибровки составила 0,001 ат.%. Среднеквадратический разброс результатов определения содержания дейтерия в воде для анализа с перезаполнением кюветы не превышал $\pm 0,003$ ат.%. .

Для анализа тяжелой воды с низким содержанием дейтерия была выбрана полоса поглощения 5. На кювете толщиной 216 мкм с оптическими окнами из CaF_2 для тяжелой воды ($a_{\text{D}} < 1$ ат.%) была получена линейная калибровочная зависимость a_{D} (ат.%) = $0,4066 + 0,0065 S_{\text{пика}}$. Погрешность калибровки составила 0,002 ат.%. Среднеквадратический разброс результатов определения содержания дейтерия в воде для анализа с перезаполнением кюветы не превышал $\pm 0,005$ ат.%. .

Чтобы отработать анализ тяжелой воды во всем диапазоне концентраций (от природной до концентрированной тяжелой воды), для различных полос поглощения получены калибровочные зависимости методом интегрирования. Анализ полученных результатов показал, что наиболее чувствительной для по-

строения калибровочных зависимостей является полоса 2. Следует отметить, что при работе на этой полосе пропускание T всех образцов тяжелой воды больше 10%, причем при увеличении толщины кюветы происходит повышение чувствительности анализа. В результате во всем диапазоне концентраций тяжелой воды ($0,015$ ат.% $< a_{\text{D}} < 99,9$ ат.%) на кюветках с оптическими окнами из CaF_2 различной толщины были проведены измерения и получены калибровочные зависимости вида

$$a_{\text{D}} = l - bS_{\text{пика}} + cS_{\text{пика}}^2$$

на кювете 127 мкм

$$a_{\text{D}} (\text{ат.}\%) = 138,4 - 0,9851S_{\text{пика}} + 0,00157S_{\text{пика}}^2$$

на кювете 220 мкм

$$a_{\text{D}} (\text{ат.}\%) = 138,7 - 0,5759S_{\text{пика}} + 0,000533S_{\text{пика}}^2$$

на кювете 323 мкм

$$a_{\text{D}} (\text{ат.}\%) = 138,6 - 0,3837S_{\text{пика}} + 0,000232S_{\text{пика}}^2$$

Погрешность калибровки составила 0,8 ат.% – для широкого диапазона концентраций (от природного содержания до концентрированной тяжелой воды); 0,2 ат.% – для диапазона $50,0$ ат.% $< a_{\text{D}} < 99,9$ ат.%. Анализ полученных калибровок показал, что

1) свободные члены совпали (с точностью до их погрешности, равной $\pm 0,3$);

2) существует зависимость коэффициентов от толщины кюветы d (мкм): $b_1 d_1 = b_2 d_2$, $c_1 (d_1)^2 = c_2 (d_2)^2$.

Заключение

Развита методика изотопного анализа тяжелой воды методом ИК спектроскопии.

1. Показано, что в общем случае зависимость натурального показателя поглощения тяжелой воды $\alpha(\nu)$ от ее концентрации с точностью до 0,1 ат. % имеет квадратичный характер.

2. Показано, что при содержании в тяжелой воде одного из изотопов водорода H или D менее 1 ат. % зависимость натурального показателя поглощения $\alpha(\nu)$ от концентрации тяжелой воды становится линейной.

3. На основе проведенного анализа на ИК спектрофотометре Specord M80 и ИК фурье-спектрометре Tensor 37 экспериментально получены зависимости $\alpha(\nu)$ от концентрации тяжелой воды, которые имеют ожидаемый вид. Погрешность использованных теоретических приближений оказалась существенно ниже полученных инструментальных погрешностей.

В настоящее время представленная методика готовится к метрологической аттестации.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Jamme E., Wood J.I.* Experience with heavy water management in the Halden reactor during operation on its second fuel charge // Technical report HPR-92. 1967. 57 p.
2. *Петров Ю.В.* Выбор параметров реакторов для физических исследований // Препринт ЛИЯФ – 802. Л., 1982. 62 с.

3. *Alekseev I.A., Bondarenko S.D., Vasyanina T.V., Grushko A.I., Karpov S.P., Konoplev K.A., Trenin V.D., Fedorchenko O.A., Arkhipov E.A., Voronina T.V., Uborsky V.V.* The study of CECE process at the experimental industrial plant // Proc. of the 20th Symposium on Fusion Technology // Fusion Technology. 1998. P. 959–962.
4. *Куршенбаум И.* Тяжелая вода // М.: Изд. ИЛ, 1953. С. 53.
5. *Юхневич Г.В.* Инфракрасная спектроскопия воды // М.: Наука, 1973. С. 19.
6. *Bayly J.G., Kartha V.B., Stevens W.N.* The Absorption Spectra of Liquid Phase H₂O, HDO and D₂O from 0,7 μm to 10 μm // Infrared Physics. 1963. V. 3. P. 211–222.
7. *Yamatara H., Fitzpatrick B., Gordon G.* Near infrared spectra of water and aqueous solution // J. Molecular Spectroscopy. 1964. P. 268–278.
8. *Воронина Т.В., Федорченко О.А.* Измерение содержания протия в высококонцентрированной тяжелой воде методом ИК спектрофотометрии // Оптический журнал. 2003. Т. 70. № 2. С. 18–22.
9. Методика измерения атомной доли протия в тяжелой воде методом ИК спектрофотометрии МВИ № 1038Р // Свидетельство об аттестации МВИ № 242/133. ВНИИМ им. Д.И. Менделеева. 2005. 27 с.
10. *Alekseev I.A., Bondarenko S.D., Trenin V.D., Fedorchenko O.A., Uborsky V.V.* Full-scale experimental studies of the various type mass exchange packings by water distillation // Fusion Technology. 1995. V. 28. P. 1579–1584.
11. *Воронина Т.В.* Развитие метода инфракрасной спектрофотометрии для анализа изотопного состава низкоконцентрированной тяжелой воды // Сб. научн. трудов “Технологии и системы обеспечения жизненного цикла ЯЭУ. Радиохимический контроль и экологический мониторинг в атомной энергетике”. СПб.: Изд. “Менделеев”, 2004. С. 110–114.