

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ
БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ

ISSN 2410-4914

**Физический
ИНСТИТУТ**



*имени
П.Н. Лебедева*

Российской академии наук

Ф И А Н

ПРЕПРИНТ

12

С. К. МАНКЕВИЧ, Е. П. ОРЛОВ

**АБСОРБЦИОННО-СПЕКТРАЛЬНЫЙ
МЕТОД КОНТРОЛЯ ХАРАКТЕРИСТИК
ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ В ЯДЕРНОМ
ЭНЕРГЕТИЧЕСКОМ РЕАКТОРЕ**

Москва — 2015

ПРЕПРИНТЫ ФИАН им. П. Н. ЛЕБЕДЕВА

ISSN 2410-4914

Главный редактор В. И. Ритус, *зам. главного редактора* А. А. Гиппиус,
научный секретарь С. А. Богачев, *ответственный секретарь* Л. В. Селезнев

Редакционная коллегия: В. С. Бескин, А. А. Горбацевич, О. Д. Далькаров,
Е. И. Демихов, И. Г. Зубарев, К. П. Зыбин, А. А. Ионин, Н. Н. Колачевский,
Е. Р. Корешева, С. Ф. Лихачев, А. С. Насибов, И. Д. Новиков, В. Н. Очкин,
Н. Г. Полухина, В. С. Лебедев, Н. Н. Сибельдин, Д. Р. Хохлов, С. А. Чайковский

Информация

Препринты ФИАН им. П. Н. Лебедева издаются с 1964 г.

Издатель: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Физический институт им. П. Н. Лебедева Российской академии наук (ФИАН)

Адрес редакции: Россия, 119991 Москва, Ленинский просп., 53, ФИАН

Тел.: +7 (499) 132-6137, +7 (499) 783-3640;

E-mail: preprins@sci.lebedev.ru, irinakh@sci.lebedev.ru

Страница сборника «Препринты ФИАН им. П. Н. Лебедева» в интернете:

<http://preprints.lebedev.ru/>

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
ФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ ИМ. П.Н. ЛЕБЕДЕВА

С. К. Манкевич, Е. П. Орлов

**АБСОРБЦИОННО-СПЕКТРАЛЬНЫЙ МЕТОД КОНТРОЛЯ
ХАРАКТЕРИСТИК ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ В ЯДЕРНОМ
ЭНЕРГЕТИЧЕСКОМ РЕАКТОРЕ**

№ 12

Москва 2015

С.К.Манкевич, Е.П.Орлов

Абсорбционно-спектральный метод контроля характеристик теплоносителя в ядерном энергетическом реакторе

Предложено использовать абсорбционно-спектральный фотометрический метод контроля концентрации борной кислоты в теплоносителе первого и последующих контуров охлаждения ядерного энергетического реактора водо-водяного типа. Экспериментально измерен коэффициент поглощения борной кислоты в наиболее коротковолновой части УФ диапазона, где её поглощательная способность является наибольшей, и показано, что чувствительность классического абсорбционного метода не позволяет обеспечить в полном объеме контроль концентрации борной кислоты. Предложена модификация метода, основанная на многократном прохождении зондирующего лазерного излучения по кольцу оптической обратной связи, включающей измерительную проточную кювету, подсоединенную к контуру теплоносителя ядерного реактора. Проведены исследования модифицированного метода. Показано, что его чувствительность увеличивается пропорционально числу оборотов зондирующего лазерного излучения по кольцу оптической обратной связи. По результатам моделирования определена предельная чувствительность метода, составляющая 0,01 мг/л вещества теплоносителя. Показана возможность реализации предлагаемого метода и измерительной системы на основе современной аппаратуры. Обсуждается перспективность его использования в ядерной энергетике, а также в различных областях промышленности и исследовании окружающей среды.

S.K.Mankevich, E.P.Orlov

Absorption-spectral method for monitoring the descriptions of heat carrier in nuclear power reactor

Absorption-spectral method for monitoring boric acid concentration in heat carrying agent in the primary and subsequent coolant circuits of nuclear water-moderated water-cooled reactor was proposed. The absorption factor of boric acid in the shortest part of ultraviolet range, where its absorptive power reaches maximum, was measured, and it was shown that the sensitivity of classical absorption-spectral method doesn't allow one to provide in full the control of boric acid concentration. The authors proposed a modification of the method based on multiple passing of probing laser radiation by the feedback loop which contains a measuring flow-through cell connected to the coolant circuit of nuclear water-moderated water-cooled reactor using the bypass channels. The investigations of the modified method were carried out, and it was found that its sensitivity increases proportionally to the turnover number of the probing laser radiation by the feedback loop. The ultimate sensitivity of this modified method was determined from the simulated results, and it equals 0.01 mg per liter of heat carrying agent. Possible realization of the introduced method and the measuring system on the basis of modern apparatus was shown. The method shows great promise in the nuclear power engineering and in different fields of industry and environmental research as well.

1. Введение

В современной ядерной энергетике одной из важных проблем является задача создания системы оперативного и дистанционного измерения и контроля характеристик теплоносителя в контуре охлаждения водо-водяного энергетического ядерного реактора (ВВЭР). Создание и внедрение такой системы на существующих атомных электростанциях (АЭС) позволит оперативно управлять текущими характеристиками АЭС – параметрами системы поглотителя нейтронов. Это в свою очередь обеспечит повышение эффективности и безопасности в работе АЭС.

Поглотителем нейтронов в контуре охлаждения ядерного ВВЭР является водный раствор борной кислоты, содержащей изотоп атома бора ^{10}B , имеющего очень высокое сечение захвата тепловых нейтронов, равное 3837 барн [1(С. 1103)]. Для большинства же нуклидов это сечение близко к единицам или долям барна, причём при захвате нейтрона образуются два нерадиоактивных ядра (альфа-частица и литий-7), очень быстро тормозящиеся в среде, а проникающая радиация (гамма-кванты) при этом отсутствует, в отличие от аналогичных реакций захвата нейтронов другими нуклидами. Поэтому ^{10}B в составе борной кислоты и других химических соединений применяется в атомных реакторах для регулирования реактивности, а также для биологической защиты от тепловых нейтронов.

Количество атомов ^{10}B в составе теплоносителя является фактором, определяющим режим работы ядерного реактора. Изменяя количество атомов ^{10}B в составе теплоносителя путём изменения концентрации борной кислоты можно изменять режим работы ядерного реактора. Изменение концентрации атомов ^{10}B в составе теплоносителя позволяет осуществить регулирование и компенсацию выгорания топливных стержней (ТВЭЛ) в рабочем режиме ядерного реактора. Это обусловлено тем, что степень поглощения нейтронов зависит от концентрации атомов ^{10}B в составе теплоносителя. Образующиеся нейтроны вследствие наличия в составе теплоносителя атомов ^{10}B выключаются из цепной реакции. Устраняется неравномерность распределения генерируемой мощности, возникающая при использовании стандартных управляющих механических элементов в ядерном реакторе. Поэтому точное и оперативное измерение концентрации атомов ^{10}B в составе теплоносителя в первом контуре и подчиненных контурах необходимо для эффективного управления работой ядерного реактора и повышения безопасности атомных электростанций. Молекула борной кислоты

H_3BO_3 содержит один атом ^{10}B . Поэтому измерение концентрации борной кислоты в контуре теплоносителя ядерного реактора эквивалентно измерению концентрации атомов ^{10}B .

Известны различные методы измерения концентрации борной кислоты в её водных растворах, используемые в различных отраслях народного хозяйства [2 – 8]. В ядерной энергетике основным методом измерения концентрации борной кислоты в контуре теплоносителя является химический метод измерения [2, 6], основанный на взятии пробы вещества теплоносителя непосредственно из контура теплоносителя с помощью специального устройства для отбора пробы из основного первого контура теплоносителя непосредственно в рабочем режиме ядерного реактора. Далее полученную пробу вещества теплоносителя в специальных лабораторных условиях, обеспечивающих защиту от радиации, подвергают воздействию ряда химических веществ, вызывающих люминесценцию исследуемого вещества пробы. Уровень концентрации борной кислоты определяют по интенсивности люминесценции обработанного вещества пробы из контура теплоносителя. Этот метод определения концентрации борной кислоты в контуре теплоносителя характеризуется невысокой точностью, особенно при определении малых концентраций борной кислоты, что обусловлено влиянием различных факторов при обработке пробы набором специальных веществ, возбуждающих люминесценцию при взаимодействии с раствором борной кислоты. Значительным недостатком данного метода является опасность радиационного поражения, которой подвергается персонал АЭС при транспортировке взятой пробы в лабораторный отсек и при осуществлении обработки и измерения параметров полученного вещества пробы. Данный метод характеризуется также малой оперативностью, так как транспортировка и обработка пробы занимает значительное время и не позволяет достаточно быстро и многократно получать информацию о параметрах теплоносителя в контуре ядерного реактора.

Известны радиационные методы определения концентрации атомов ^{10}B в составе теплоносителя в контуре ядерного реактора [3 – 5]. Эти методы основаны на прямом измерении параметров нейтронного потока на выходе ядерного реактора, либо используют измерение поглощения нейтронного потока при облучении вещества теплоносителя источником нейтронного излучения. Первый метод характеризуется низкой точностью и малой чувствительностью и позволяет осуществлять измерение только больших концентраций атомов ^{10}B в составе теплоносителя. Второй метод использует облучение вещества теплоносителя

внешним источником нейтронного излучения и измерение уровня поглощения нейтронов с помощью специального измерительного прибора. При этом измерительный прибор и источник нейтронов устанавливаются на действующем трубопроводе контура теплоносителя ядерного реактора. Облучающий измерительный поток нейтронов проходит перпендикулярно трубопроводу и протекающему веществу теплоносителя и захватывает малую часть его объема. Вследствие этого точность определения концентрации атомов ^{10}B оказывается невысокой, особенно при определении малых концентраций ^{10}B в составе теплоносителя. Следует отметить в качестве недостатков большую сложность монтажа и обслуживания аппаратуры радиационного измерения, которая располагается непосредственно на элементах трубопроводов контура теплоносителя в зоне действия радиации. В указанных методах отсутствует возможность контроля технического состояния радиационной измерительной аппаратуры, что существенно снижает достоверность получаемой информации.

Таким образом, известные в настоящее время методы измерения концентрации атомов ^{10}B в составе теплоносителя в контуре ядерного реактора характеризуются невысокой точностью, большой сложностью в техническом обслуживании в условиях радиации при работе ядерного реактора, опасностью радиационного поражения обслуживающего персонала АЭС.

Наиболее точным методом определения концентрации атомов ^{10}B в водном растворе борной кислоты является оптический фотометрический метод измерения [9]. Однако для применения этого метода измерений параметров теплоносителя непосредственно в контуре работающего ядерного реактора необходимо решить ряд связанных с этим проблем.

К таким проблемам относится задача измерения весьма малых концентраций борной кислоты в водном растворе при малом коэффициенте поглощения борной кислоты в оптическом диапазоне. Минимальный требуемый уровень измерения концентрации борной кислоты составляет порядка 0,1 миллиграмм на литр вещества теплоносителя, что составляет одну десятимиллионную долю по весу. Здесь следует отметить, что радиационный метод измерения концентрации ^{10}B характеризуется минимальной измеримой величиной, равной одной тысячной доле по весу [3, 10(С.С. 104 – 106)]. Важной проблемой является также обеспечение указанных параметров измерения на расстоянии от ядерного реактора порядка 50 – 100 метров позволяющее вынести собственно измерительную оптическую аппаратуру в помещение, безопасное в радиационном отношении.

Для решения указанных задач авторами данной работы предложена специальная модификация известного абсорбционно-спектрального фотометрического метода измерений, позволяющая оперативно с указанной точностью измерять концентрацию борной кислоты непосредственно в контуре теплоносителя ядерного ВВЭР [11]. Измерение осуществляется путем многократного просвечивания зондирующим лазерным излучением измерительной оптической кюветы с оптически прозрачными окнами-иллюминаторами, подключенной к контуру теплоносителя ядерного ВВЭР посредством байпасного трубопровода. Измерительная аппаратура связана с измерительной кюветой волоконно-оптической линией и находится в радиационно-безопасном помещении.

Рассмотрим эту модификацию более подробно, предварительно восстановив в памяти основные черты абсорбционно-спектрального метода.

2. Абсорбционно-спектральный метод

Абсорбционно-спектральный метод основан на определении характеристик поглощения и пропускания исследуемых веществ в различных спектральных диапазонах. Основными законами здесь являются закон Бугера-Ламберта-Бера [12(С.С. 60, 862)] и соотношение световых потоков.

Баланс световых потоков подчиняется следующему закону:

$$I_0 = I + I_a + I_r, \quad (1)$$

где I_0 - исходный падающий световой поток; I - световой поток, прошедший через исследуемый слой вещества; I_a - поглощенный веществом световой поток; I_r - отраженный световой поток.

Закон Бугера-Ламберта определяет, что при прохождении любого слоя вещества толщиной L интенсивность светового потока уменьшается на определенную долю, зависящую только от толщины слоя вещества и показателя экстинкции β , который не зависит от интенсивности светового потока. В соответствии с этим величина светового потока, прошедшего через слой исследуемого вещества, определяется из следующего уравнения:

$$I = I_0 \exp(-\beta L). \quad (2)$$

Показатель экстинкции $\beta = \alpha + \rho$, где α - показатель поглощения, а ρ - показатель рассеяния света.

Закон Бера утверждает, что для растворов показатель поглощения α , пропорционален концентрации C исследуемого вещества. Таким образом, основное

уравнение, связывающее падающий и прошедший световые потоки и концентрацию исследуемого вещества согласно закону Бугера-Ламберта-Бера может быть представлено в следующем виде:

$$I = I_0 \exp(-KCL - \rho L), \quad (3)$$

где K – коэффициент поглощения исследуемого вещества; L – толщина его слоя; C – его концентрация в весовых (массовых) единицах на единицу объёма. Размерности указанных величин следующие: $[L] = \text{см}$, $[C] = \text{г/л}$, $[K] = \text{л} \cdot \text{г}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$. В настоящей работе предполагается, что рассеяния света нет ($\rho = 0$), и что примеси, которые могут содержаться в веществе теплоносителя, не оказывают заметного влияния на величину коэффициента поглощения K .

Коэффициент поглощения является величиной, определяющей поглощательную способность некоторой единичной концентрации исследуемого вещества на единичном пути прохождения светового потока ($L = 1 \text{ см}$). Указанный выше показатель поглощения α равен произведению коэффициента поглощения K и концентрации исследуемого вещества C : $\alpha = KC$. Коэффициент поглощения зависит от длины волны (спектрального диапазона) просвечиваемого слой вещества светового потока. Таким образом, зная величину коэффициента поглощения K исследуемого вещества для использованной в эксперименте длины волны светового потока, осуществляя просвечивание исследуемого вещества с известной толщиной слоя L и определяя величину прошедшего светового потока I по отношению к величине падающего светового потока I_0 , можно определить концентрацию данного вещества C , находящегося на пути распространения светового потока. Формула для определения концентрации C исследуемого вещества (например, борной кислоты в составе теплоносителя ядерного реактора), полученная на основании уравнения (3) и указанных выше предположений, имеет следующий вид :

$$C = \frac{1}{KL} \ln \frac{I_0}{I} = \frac{1}{KL} \ln \frac{I_0}{I_0 - V}, \quad (4)$$

где $V = I_0 - I$ – величина, на которую уменьшается световой поток при прохождении слоя исследуемого вещества толщиной (длиной) L . Формула (4) является основной для определения концентрации вещества C в абсорбционно-спектральном методе.

Произведение KL в формуле (4) определяет чувствительность абсорбционно-спектрального метода измерений. Действительно, основной техникой измеряемой величиной является величина V в (4), которая обусловлена уменьше-

нием уровня светового потока после прохождения слоя исследуемого вещества по сравнению с уровнем светового потока, поступающего на вход слоя исследуемого вещества. Измерение параметров светового потока (импульса зондирующего лазерного излучения) после прохождения через слой исследуемого вещества является основной операцией абсорбционно-спектрального метода. Основным измеряемым параметром здесь является отношение $P_{\text{measure}} = V / I_0$, которое далее используется в соотношении (4) для непосредственного определения концентрации борной кислоты или других измеряемых данным методом веществ. Для обеспечения достаточно высокой точности измерений уровней световых потоков с помощью современной аппаратуры отношение P_{measure} должно превышать некоторый пороговый уровень измерения малых величин в указанной аппаратуре. Для современной измерительной аппаратуры такой уровень составляет величину порядка 1%. Таким образом, при осуществлении измерений абсорбционно-спектральным методом для получения высокой требуемой точности измерений относительная величина P_{measure} уменьшения светового потока должна быть не меньше одного процента от величины светового потока, поступающего на вход измерительной кюветы, то есть удовлетворять соотношению

$$P_{\text{measure}} = V / I_0 > 0,01. \quad (5)$$

Можно утверждать, что величина P_{measure} определяет пороговую величину минимальной концентрации исследуемого вещества, например, раствора борной кислоты в теплоносителе ядерного реактора, которую можно измерить при данной известной величине K на выбранной для измерений длине волны оптического излучения.

Как было показано выше связь падающего и прошедшего световых потоков и концентрации исследуемого вещества C определяется формулой (3). Согласно соотношениям (3) и (5) минимальная измеряемая концентрация C_{min} может быть определена из следующего уравнения

$$P_{\text{measure}} = 1 - \exp(-KCL). \quad (6)$$

Разлагая в ряд экспоненту при малых величинах K и C , получаем для C_{min} :

$$C_{\text{min}} = P_{\text{measure}} / KL. \quad (7)$$

Величина C_{min} в (7) определяет минимально-возможную измеряемую концентрацию борной кислоты и является чувствительностью (потенциальной) абсорбционно-спектрального метода и одновременно чувствительностью аппаратуры, применяемой для измерений. Одновременно данная величина характе-

ризует точность производимых измерений, так как определяет минимальную регистрируемую градацию изменения концентрации C борной кислоты в составе исследуемого вещества теплоносителя. Из (7) следует, что чувствительность метода определяется произведением величин KL и увеличивается (в смысле уменьшения минимально-регистрируемой величины C_{\min}) при увеличении произведения KL .

3. Модификация метода

Как говорилось выше, авторами данной работы предложена специальная модификация абсорбционно-спектрального фотометрического метода измерения концентрации борной кислоты в составе контура теплоносителя ядерного ВВЭР [11]. Измерение осуществляется путем многократного просвечивания слоя вещества теплоносителя лазерным излучением видимого и ультрафиолетового диапазонов длин волн и последующего измерения величины оптического поглощения излучения, прошедшего через слой исследуемого вещества теплоносителя. Для осуществления данного измерения параметров теплоносителя используется специальная измерительная проточная кювета с прозрачными для лазерного излучения оптическими окнами – иллюминаторами. Данная измерительная кювета с помощью специальных патрубков подсоединена к контуру теплоносителя ядерного реактора посредством байпасного ответвляющего трубопровода. При этом длина (оптическая) измерительной кюветы L соответствует длине слоя исследуемого вещества в основной формуле для определения концентрации C (4).

Борная кислота, присутствующая в составе теплоносителя ядерного реактора в виде водного раствора, характеризуется очень малой величиной поглощения оптического излучения и, соответственно, малой величиной коэффициента поглощения K . Заметное поглощение оптического излучения борной кислотой имеет место в ультрафиолетовом диапазоне длин волн 200 – 400 нм. Однако и в этом диапазоне поглощение излучения борной кислотой является очень малым и обуславливает принятие специальных мер для повышения чувствительности абсорбционно-спектрального метода при измерении малых значений концентрации борной кислоты, необходимых при осуществлении контроля и управления работой ядерного энергетического реактора.

Проведенные авторами экспериментальные исследования поглощения оптического излучения водным раствором борной кислоты различной concentra-

ции в диапазоне длин волн от видимого до ультрафиолетового показали, что наибольшей величины коэффициент поглощения достигает в ультрафиолетовом диапазоне на длине волны порядка 220 нм и составляет $0.164 \text{ л} \cdot \text{г}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$.

Малая величина поглощения ($K \ll 1 \text{ л} \cdot \text{г}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$) существенно увеличивает согласно (7) величину минимальной регистрируемой концентрации борной кислоты и, соответственно, приводит к ухудшению чувствительности используемой измерительной аппаратуры. Поэтому при осуществлении измерений малых концентраций борной кислоты возникает проблема увеличения чувствительности измерительной аппаратуры. Стандартным абсорбционно-спектральным методом возможно проведение измерений сравнительно больших концентраций борной кислоты. Так например, согласно формуле (7) при длине измерительной кюветы $L = 1 \text{ см}$, используемой в современных спектрофотометрических приборах, при коэффициенте поглощения борной кислоты $K = 0.164 \text{ л} \cdot \text{г}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$ на наиболее короткой длине волны современных лазерных генераторов УФ диапазона порядка 220 нм и величине $P_{\text{measure}} = 0,01$ получаем минимальное значение измеряемой концентрации борной кислоты (чувствительность системы измерений) $C_{\text{min}} = 60 \text{ мг/л}$ вещества теплоносителя, что существенно превышает минимальный необходимый уровень измерения концентрации борной кислоты в контуре теплоносителя современных ядерных энергетических реакторов, имеющий порядок $0,1 \text{ мг/л}$ объема вещества теплоносителя. Измерение концентрации борной кислоты на основе однократного прохождения лазерного излучения через слой исследуемого вещества (измерительную кювету) возможно только для достаточно больших значений концентрации борной кислоты порядка десятых долей грамма на один литр вещества теплоносителя и более высоких концентраций ($0,1 - 100 \text{ г/л}$).

Для осуществления измерения меньших значений концентрации борной кислоты согласно формуле (5) и классическому методу измерений необходимо увеличивать длину измерительной кюветы L , или увеличивать поперечные габариты кюветы и использовать несколько проходов излучения по многоходовой измерительной кювете. Эти способы увеличения чувствительности используемого абсорбционно-спектрального метода неприемлемы для системы измерений, предназначенной для работы в условиях ядерного реактора. Поэтому для решения задачи увеличения чувствительности измерительной системы в условиях работы ядерного реактора в данной работе предложено использовать многократное прохождение измерительного (зондирующего) лазерного излучения че-

рез исследуемый слой вещества теплоносителя (измерительную кювету). Это осуществляется путем организации оптической обратной связи выхода измерительной кюветы с её оптическим входом посредством ряда оптических элементов.

На рис.1 представлена оптическая схема измерительной системы, с помощью которой осуществляется измерение концентрации борной кислоты непосредственно в контуре теплоносителя ядерного энергетического реактора. Данная измерительная система впервые предложена авторами в работе [11].

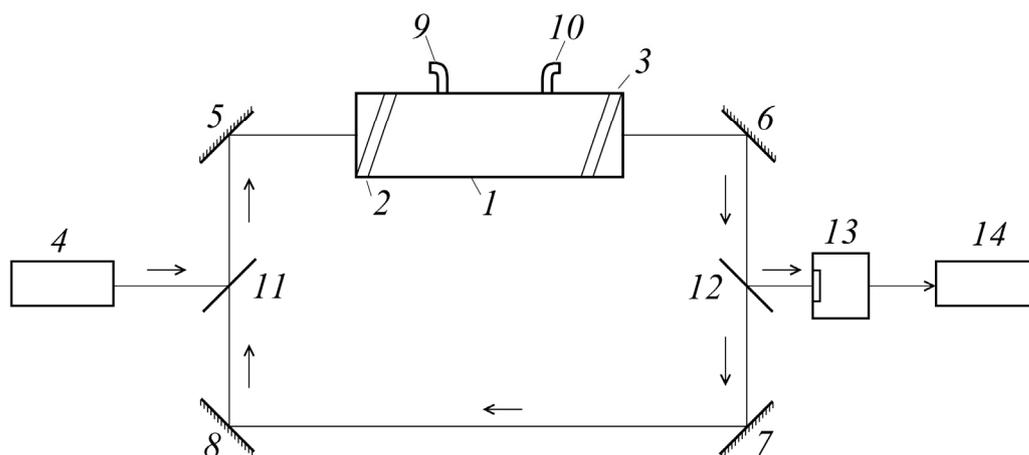


Рис.1. Оптическая схема измерительной системы: 1 – измерительная проточная кювета; 2, 3 – оптически-прозрачные окна; 4 – лазерный генератор; 5, 6, 7, 8 – отражательные зеркала; 9, 10 – специальные патрубки для подсоединения к байпасной линии в контуре теплоносителя ядерного реактора; 11, 12 – полупрозрачные зеркала; 13 – фотоприёмник; 14 – компьютер.

Система измерений содержит измерительную проточную кювету 1 с оптически прозрачными окнами 2 и 3. Лазерный генератор 4 генерирует импульс лазерного излучения в ультрафиолетовом диапазоне, в котором борная кислота обладает наибольшим поглощением. Указанная выше оптическая обратная связь организована с помощью отражательных зеркал 5, 6, 7 и 8, которые образуют замкнутое кольцо, в которое помещена измерительная кювета 1. Измерительная кювета 1 с помощью специальных патрубков 9 и 10 подсоединена к байпасной линии в контуре теплоносителя ядерного реактора. Вследствие этого подключаемый циркулирующий в контуре охлаждения ядерного реактора теплоноситель проходит через измерительную кювету 1.

Вещество теплоносителя непрерывно просвечивается лазерным (зондирующим) излучением, генерируемым лазерным генератором 4. Отражательные

зеркала 5 – 8 образуют кольцевой оптический резонатор, в который включен пассивный поглощающий элемент – измерительная кювета 1. Лазерное излучение в данный кольцевой резонатор вводится посредством полупрозрачного зеркала 11. Вывод излучения из указанного кольцевого резонатора осуществляется с помощью полупрозрачного зеркала 12. Далее излучение, выведенное из кольцевого резонатора, поступает на оптический вход фотоприемника 13. С выхода фотоприемника 13 оцифрованный сигнал, соответствующий зарегистрированному импульсу лазерного излучения, поступает на вход компьютера 14, в котором осуществляется обработка информации и определение параметров вещества теплоносителя в контуре ядерного реактора.

Измерительная кювета 1 размещена в непосредственной близости от трубопровода первого контура ядерного реактора в помещении, подверженном действию радиации. Измерительная кювета соединена волоконно-оптической линией с измерительной аппаратурой, размещенной в отдельном помещении, безопасном в радиационном отношении. Волоконно-оптическая линия на рис.1 не показана. В кольцевом резонаторе введенный импульс лазерного излучения совершает множество последовательных оборотов до полного своего исчезновения. При этом на каждом отдельном обороте по кольцу оптической обратной связи часть лазерного зондирующего импульса ответвляется посредством полупрозрачного зеркала 12 на вход фотоприемника и регистрируется. В результате в компьютере 14 запоминается серия импульсов зондирующего лазерного излучения, совершивших определенное число оборотов N по кольцу оптической обратной связи, включающему измерительную кювету с веществом контура теплоносителя ядерного реактора. При этом с каждым новым оборотом по кольцу оптической обратной связи увеличивается длина пути, пройденного зондирующим лазерным излучением в исследуемом веществе теплоносителя в измерительной кювете 1. Соответственно увеличивается поглощение лазерного излучения, прошедшего увеличенный путь в веществе теплоносителя. Это позволяет повысить чувствительность системы измерений и обеспечить измерение меньших концентраций борной кислоты в составе теплоносителя в измерительной кювете 1.

Итак, с помощью введенной обратной связи осуществляется многократное прохождение исходного импульса лазерного излучения через измерительную кювету с фиксированной ограниченной длиной рабочей зоны кюветы L . В результате физический путь импульса зондирующего лазерного излучения через

исследуемое вещество кюветы увеличивается на каждом обороте импульса лазерного излучения по кольцу обратной оптической связи. При осуществлении N оборотов импульса излучения по кольцу обратной связи его путь, пройденный в веществе измерительной кюветы, увеличивается в N раз и составляет величину NL . Соответственно, импульс зондирующего лазерного излучения после прохождения N раз по кольцу оптической обратной связи через измерительную кювету будет ослаблен в $\exp(NLKC)$ раз за счет многократного прохождения через измерительную кювету (N -кратного прохождения) согласно формуле (3), которая определяет величину ослабления импульса лазерного излучения при однократном прохождении его через слой вещества длиной L , с концентрацией C , коэффициентом поглощения K .

Таким образом, при осуществлении многократного прохождения зондирующего лазерного импульса через измерительную кювету эквивалентная действующая длина L измерительной кюветы возрастает в N раз и становится равной величине NL , что обеспечивает соответствующее увеличение чувствительности системы измерения концентрации борной кислоты в составе теплоносителя, протекающего через измерительную кювету.

Для того, чтобы осуществить определение концентрации C борной кислоты по формуле (4), необходимо учесть ослабление импульса лазерного излучения при каждом его прохождении по кольцу оптической обратной связи. Далее на каждом обороте лазерного импульса происходит его ответвление с помощью полупрозрачного зеркала 12 на фотоприемник 13 . Часть энергии лазерного импульса теряется на полупрозрачном зеркале 11 , которое играет роль оптического сумматора и через которое осуществляется введение излучения зондирующего лазерного импульса в кольцо оптической обратной связи и в измерительную кювету. Следует отметить, что величины ослабления лазерного излучения, циркулирующего по кольцу обратной связи, в полупрозрачных зеркалах 12 и 11 могут быть сделаны достаточно малыми за счет уменьшения ответвляемой доли лазерного излучения в прямом ходе по полупрозрачным зеркалам 11 и 12 .

Обозначим величину пропускания лазерного излучения за один его оборот распространения по оптическому кольцу в измерительной кювете символом T_1 . Здесь индекс 1 означает принадлежность к измерительной кювете 1 . Направление распространения лазерного импульса считаем по часовой стрелке от полупрозрачного зеркала 12 . При этом коэффициент ответвления лазерного импульса полупрозрачным зеркалом 12 на вход фотоприемника обозначим T_{12} . Соответ-

ственно, обозначим коэффициент пропускания полупрозрачным зеркалом II зондирующего лазерного излучения от лазерного генератора 4 на оптическое кольцо символом T_{11} . Отсюда величину (энергию) импульса лазерного излучения, зарегистрированного фотоприемником, после N -кратного прохождения по кольцу оптической обратной связи, можно представить в следующей форме:

$$I(N) = I_{01} T_{11} T_1^N T_{12} \exp(-KCLN). \quad (8)$$

Здесь величина I_{01} является величиной импульса лазерного излучения с выхода лазерного генератора 4 .

Представленное соотношение наиболее полно отражает все факторы, влияющие на характеристики лазерного зондирующего импульса, прошедшего N раз по кольцу оптической обратной связи и зарегистрированного фотоприемником 13 . Данное соотношение позволяет определить искомую величину концентрации C борной кислоты в составе теплоносителя на основании измерений амплитуды импульса лазерного излучения $I(N)$, регистрируемого и измеряемого фотоприемником 13 , и амплитуды импульса лазерного излучения, который поступает в кольцо оптической обратной связи от лазерного генератора в каждом акте измерения однократно.

Из соотношения (8) видно, что чувствительность реализуемой процедуры проведения измерений увеличивается в соответствии с увеличением эффективной длины измерительной кюветы в N раз. Это позволяет осуществить измерение малых концентраций C борной кислоты в составе теплоносителя ядерного реактора. В соотношении (8) неизвестной является только одна величина – концентрация борной кислоты C , которая может быть определена из соотношения (8) решением соответствующего уравнения. Концентрация C на основании решения уравнения (8) может быть представлена в следующем виде:

$$C = \frac{1}{KNL} \ln \left(\frac{I_0 T_{11} T_{12} T_1^N}{I(N)} \right). \quad (9)$$

По сравнению с соотношением (4) из (9) видно, что в новом методе измерений с увеличением в N раз числа прохождения лазерного излучения через измерительную кювету появляется возможность измерения в N раз меньших концентраций C исследуемого вещества теплоносителя, протекающего через измерительную кювету (за это ответственна первая составляющая $1/KNL$ в формуле (9)). В то же время под знаком логарифма кроме отношения измеряемых лазер-

ных импульсов до и после измерительной кюветы $I_0/I(N)$ появляется множитель

$$R = T_{11}T_{12}T_1^N, \quad (10)$$

который свидетельствует об уменьшении уровня лазерного импульсного излучения (сигнала), поступающего на фотоприемник, при увеличении числа проходов данного зондирующего импульсного излучения в N раз.

Это является следствием и платой за более высокую чувствительность предлагаемого метода измерения концентрации C . Однако, как будет показано ниже, данная плата за высокую чувствительность не является слишком высокой, так как в настоящее время существуют достаточно мощные лазерные генераторы в УФ диапазоне длин волн и высокочувствительные фотоприемники УФ диапазона (ФЭУ), при использовании которых в предлагаемой измерительной системе указанное уменьшение лазерного импульса в соответствии с приведенной величиной R (10) может быть скомпенсировано и не является препятствием в реализации данного метода.

Рассмотрим еще раз соотношение (9) для определения концентрации C при однократном проходе лазерного импульса через измерительную кювету, при котором $N = 1$:

$$C = \frac{1}{KL} \ln \left(\frac{I_0 R_1}{I(1)} \right), \quad (11)$$

где $R_1 = T_{11}T_{12}T_1$. В соответствии с (10) R равно R_1 при $N = 1$. При этом единичном проходе лазерного импульса через измерительную кювету соотношение (11) совпадает с основной формулой вычисления концентрации C (4), если учесть, что пропускания полупрозрачных зеркал $I1$ и $I2$, обозначенные как T_{11} и T_{12} , были учтены при выводе (4) в процессе измерения величины лазерного зондирующего импульса на выходе лазерного генератора 4. Величина ослабления T_1 лазерного импульса при однократном проходе при выводе (4) полагалась равной единице и была опущена. Таким образом, соотношение (11) является более точной формулой для расчета концентрации C при одном проходе по сравнению со стандартной формулой (4) вследствие учета дополнительных технических параметров элементов оптического тракта измерительной системы.

Параметры пропускания оптических элементов в (10) являются в принципе известными величинами и не изменяются в процессе измерения C . Тем не ме-

нее они влияют на конечный результат и в процессе измерения эти параметры должны быть точно известны.

В составе формулы (9) также фигурирует величина R (ф-ла (10)), которая определяется пропусканием оптических элементов в кольце оптической обратной связи на рабочей длине волны лазерного генератора 4. Данную составляющую с высокой точностью можно определить отдельно с помощью измерений, производимых со второй измерительной кюветой, которая используется в качестве эталонной измерительной кюветы и которая является полным аналогом измерительной кюветы I . Измерения с использованием эталонной кюветы осуществляются следующим образом. Вначале эталонная кювета заполняется дистиллированной водой. Осуществляется измерение уровней лазерных импульсов на рабочей длине волны лазерного генератора 4 с числом оборотов N . Осуществляется просвечивание эталонной кюветы лазерным излучением на рабочей длине волны лазерного генератора I и регистрация величины лазерного импульса $I_{0st}(N)$ для эталонной кюветы, заполненной, как было отмечено выше, дистиллированной водой (составляющая индекса «0» здесь означает заполнение эталонной кюветы водой, а составляющая «st» означает эталонную кювету). В этом случае при нулевой концентрации борной кислоты в эталонной кювете ($C = 0$) регистрируемый импульс лазерного излучения на рабочей длине волны после прохождения N оборотов по кольцу оптической обратной связи равен согласно соотношению (8)

$$I_{0st}(N) = I_0 T_{11} T_{12} T_1^N. \quad (12)$$

Отсюда искомая величина R для вычисления по формуле (9) величины концентрации C равна:

$$R = T_{11} T_{12} T_1^N = I_{0st}(N) / I_0 \quad (13)$$

Таким образом, величина R для вычисления C по формуле (9) получена при измерении пропускания в эталонной кювете для лазерного импульса на рабочей длине волны при заполнении эталонной кюветы дистиллированной водой. В этом случае в величине импульса лазерного излучения (12), прошедшего через эталонную кювету N раз, отсутствует составляющая, определяемая концентрацией борной кислоты, так как эталонная кювета заполнена дистиллированной водой. При этом составляющая R (13) равна соответствующей составляющей R (10) для измерительной кюветы I . Полученная величина R (11) позволяет вычислить концентрацию борной кислоты в следующем виде при подстановке величины R (11) в основное соотношение для определения C (9):

$$C = \frac{1}{KLN} \ln \frac{I_{0st}(N)}{I(N)}. \quad (14)$$

Формула (14) определяет искомую концентрацию борной кислоты в виде соотношения известных и измеряемых физических величин. В формуле (14) за счет использования измерения в эталонной кювете, представляющей собой в данном варианте методики измерений аналог измерительной кюветы I , но без борной кислоты, исключены параметры оптической системы кольца оптической обратной связи. Измеряемыми величинами являются амплитуда лазерного импульса $I_{0st}(N)$, прошедшего через эталонную кювету с дистиллированной водой с номером N числа оборотов по кольцу обратной связи и величина амплитуды лазерного импульса $I(N)$, прошедшего через измерительную кювету с борной кислотой искомой концентрации C и числом оборотов по кольцу обратной оптической связи также равным N . Эти лазерные импульсы измеряются одним и тем же фотоприемником $I3$. Точность измерений данных лазерных импульсов может быть достаточно высокой при использовании современных высокочувствительных фотоприемников УФ диапазона и относительно мощных лазерных генераторов.

Как видно из (14) возможности измерения малых концентраций C борной кислоты определяются уровнем ослабления импульса лазерного излучения при прохождении по кольцу оптической обратной связи, $I(N)$. Это ослабление, как было показано выше, пропорционально величине $\exp(KCLN)$, которая увеличивается при увеличении числа оборотов N . Это приводит к увеличению точности измерений при использовании предлагаемого метода измерений, в котором осуществляется многократное прохождение зондирующего лазерного излучения через измерительную кювету по кольцу оптической обратной связи.

Как следует из представленных формул (9) и (14) для определения малых концентраций борной кислоты в контуре теплоносителя ядерного реактора возможно использование двух методик, использующих многократное прохождение зондирующего лазерного излучения через слой исследуемого вещества – измерительную кювету I .

Первая методика, основанная на использовании формулы (9) для определения концентрации C , использует измерение амплитуды $I(N)$ импульса зондирующего лазерного излучения, прошедшего N оборотов по цепи оптической обратной связи, включающей измерительную кювету. Далее на основе этой информации и с учетом параметров пропускания оптических элементов измери-

тельной системы, известных и измеренных заранее, определяется концентрация борной кислоты C по формуле (9).

Вторая методика измерения концентрации C борной кислоты основана на использовании формулы (14). Измеряемыми величинами, как отмечено выше, являются амплитуда лазерного импульса $I_{0st}(N)$, прошедшего через эталонную кювету с дистиллированной водой с номером N числа оборотов по кольцу обратной связи и величина амплитуды лазерного зондирующего импульса $I(N)$, прошедшего через измерительную кювету с борной кислотой искомой концентрации C и числом оборотов по кольцу обратной оптической связи также равным N . Эти лазерные импульсы измеряются одним и тем же фотоприемником 13.

Высокая точность определения малых концентраций борной кислоты реализуется в обеих указанных методиках. При этом измерение амплитуды зондирующего лазерного импульса $I_{0st}(N)$, прошедшего через эталонную кювету с дистиллированной водой и осуществившего такое же число оборотов N по кольцу обратной связи, что и зондирующий импульс лазерного излучения по кольцу оптической обратной связи с измерительной кюветой I , эквивалентно осуществлению измерений параметров пропускания оптических элементов в измерительной системе, которые представлены в формуле измерения концентрации C (9). Поэтому второй метод определения малых величин концентрации C является более простым и эффективным при практической реализации системы измерения параметров теплоносителя в контуре ядерного энергетического реактора.

4. Методика эксперимента и численное моделирование

В ходе выполнения данной работы был исследован экспериментальный образец системы измерения борной кислоты, проведено измерение различных концентраций растворов борной кислоты и измерение коэффициента поглощения борной кислоты для различных длин волн зондирующего излучения, а также проведено моделирование работы системы измерения борной кислоты в контуре теплоносителя, результаты которого приведены ниже.

Измерение коэффициента поглощения K осуществлялось на эталонной кювете при заполнении её раствором борной кислоты заранее известной (приготовленной) концентрации C_{st} . Далее осуществлялось измерение оптических параметров входного и прошедшего оптического излучения. Определение коэффициента поглощения K осуществлялось в соответствии с основным уравнением

(3), которое решалось относительно неизвестной величины K при остальных известных и измеренных величинах. В результате величина коэффициента поглощения K борной кислоты для используемой длины волны зондирующего излучения определялась из следующего соотношения:

$$K = \frac{1}{CL} \ln \frac{I_0}{I}. \quad (15)$$

В результате коэффициент поглощения борной кислоты при использовании УФ излучения с длиной волны около 220 нм оказался равным $1,64 \times 10^{-4} \text{ л} \cdot \text{см}^{-1} \cdot \text{мг}^{-1}$.

После определения коэффициента поглощения борной кислоты было проведено моделирование измерений концентрации C борной кислоты по методу сравнения пропускания зондирующего излучения в измерительной кювете и в эталонной кювете, заполненной дистиллированной водой с нулевой концентрацией борной кислоты. Моделирование измерений проведено в соответствии с соотношением (14) для следующих параметров оптической схемы: длина измерительной (и эталонной) кюветы $L = 100$ см. Число оборотов зондирующего лазерного излучения по измерительной кювете N варьировалось от 1 до 30. Коэффициент поглощения K соответствовал величине, полученной в результате проведенного эксперимента на экспериментальном образце измерительной системы.

Для моделирования было выбрано три значения концентрации борной кислоты: $C = 1$ мг/л, $0,2$ мг/л и $0,05$ мг/л. Полученные результаты показали возможность измерения указанных малых концентраций борной кислоты с помощью предлагаемой системы измерения. Далее полученные результаты моделирования параметров измерительной системы представлены для каждого значения концентрации C борной кислоты следующим образом.

Представлена зависимость отношения E_p амплитуды $I(N)$ N -го импульса зондирующего лазерного излучения, прошедшего N оборотов по измерительной кювете I , к амплитуде $I_0(N)$ такого же N -го импульса зондирующего лазерного излучения, прошедшего N оборотов, но по эталонной кювете, в которой концентрация борной кислоты равна нулю и которая заполнена дистиллированной водой:

$$E_p = I(N) / I_0(N). \quad (16)$$

Данное отношение E_p является, как это следует из формулы (14), основной величиной, по которой определяется концентрация борной кислоты C . Результаты моделирования представлены в табл.1. По результатам измерений, представленных в табл.1, видно как при увеличении количества оборотов N им-

пульса зондирующего лазерного излучения по измерительной кювете происходит увеличение чувствительности измерительной системы и появляется возможность измерения всё меньших концентраций борной кислоты в составе теплоносителя ядерного реактора.

Таблица 1

Результаты моделирования в случае измерения концентрации $C = 1$ мг/л			
$N = 1$	10	20	30
$E_p = 0.9837$	0,848	0,720	0,61
Результаты моделирования в случае измерения концентрации $C = 0,2$ мг/л			
$N = 1$	10	20	30
$E_p = 0,996$	0,967	0,936	0,906
Результаты моделирования в случае измерения концентрации $C = 0,05$ мг/л			
$N = 1$	10	20	30
$E_p = 0,99918$	0,9918	0,9837	0,975

Так например, при измерении концентрации борной кислоты $C = 1$ миллиграмм на литр вещества теплоносителя вполне достаточно использовать десять оборотов импульса зондирующего лазерного излучения по измерительной кювете. При этом количестве числа оборотов величина ослабления импульса лазерного излучения по сравнению с импульсом, прошедшим через эталонную кювету с нулевой концентрацией борной кислоты $E_p = 0.848$. Другими словами величина ослабления импульса лазерного излучения, прошедшего через слой теплоносителя, по сравнению с эталонным импульсом, равна 15,2 процента, что вполне достаточно для проведения точных измерений. Соответственно, ослабление импульса лазерного излучения, прошедшего через измерительную кювету, при концентрации $C = 0,2$ мг/л составляет около 10% при 30 оборотах, что также обеспечивает высокую точность проведения измерений.

Предельная минимальная величина измеряемой концентрации борной кислоты при данных выбранных параметрах измерительной системы равна $C = 0,05$ мг/л вещества теплоносителя (50 мкг/л) и достигается при числе оборотов $N = 30$. Предельная (пороговая) чувствительность моделируемой измерительной

системы, вычисленная по формуле (7), составляет при $N = 30$ оборотах величину $C = 0,02$ мг/л вещества теплоносителя. Данная величина характеризует также точность производимых измерений концентрации борной кислоты в составе теплоносителя ядерного реактора.

Следует отметить, что реализация измерений при большом числе N оборотов импульса зондирующего лазерного излучения по измерительной и эталонной кюветам обеспечивается достаточно высоким уровнем энергии генерируемого лазерного излучения и высокой чувствительностью фотоприемника в УФ-диапазоне – фотоэлектронного умножителя (ФЭУ). Использование большого числа оборотов N зондирующего лазерного излучения по измерительной кювете позволяет в свою очередь увеличить чувствительность абсорбционно-фотометрического метода измерений, что позволяет обеспечить высокую точность при измерении весьма малых концентраций борной кислоты C в составе теплоносителя ядерного реактора.

Проведено также моделирование измерений больших концентраций борной кислоты, результаты которого представлены в табл.2, а именно представлены результаты измерений концентраций борной кислоты от 10 до 100 мг/л теплоносителя, полученные при одном обороте импульса зондирующего лазерного излучения по измерительной кювете ($N = 1$).

Таблица 2

C , мг/л	10	20	50	100
E_p	0,848	0,72	0,44	0,19

Как видно из табл.2 при измерении больших уровней концентрации борной кислоты для обеспечения высокой точности измерений достаточно однократного прохождения зондирующего импульса по измерительной кювете. При этом уровень ослабления величины импульса зондирующего лазерного излучения по сравнению с эталонным импульсом зондирующего лазерного излучения изменяется от 15% при $C = 10$ мг/л до 81% при $C = 100$ мг/л.

На рис.2 представлены результаты моделирования работы системы измерений в соответствии с табл.1 при осуществлении измерений концентрации борной кислоты $C = 1$ мг/л вещества теплоносителя.

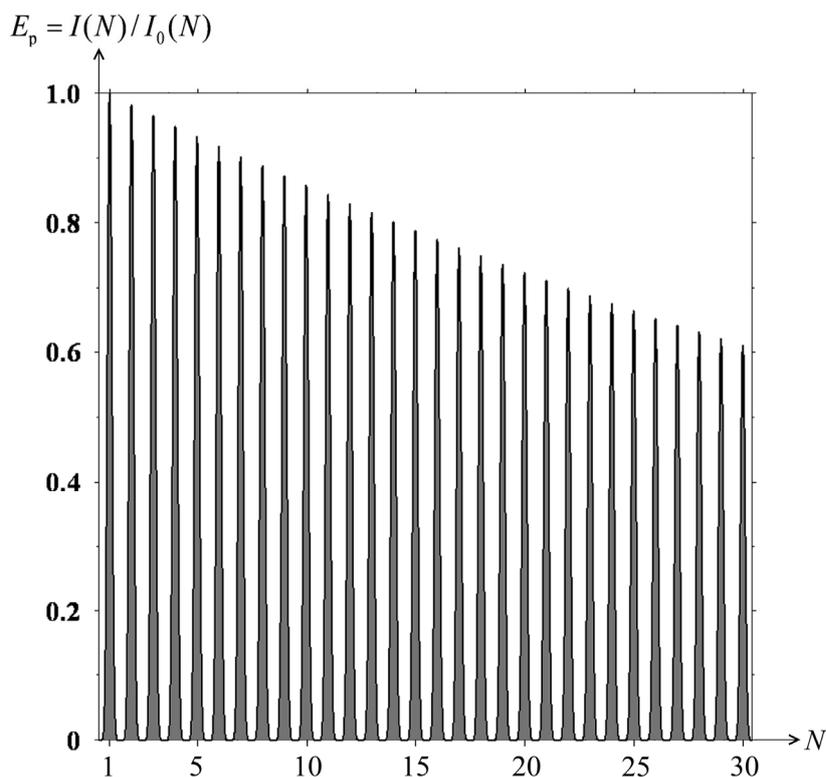


Рис.2. Величина $I(N)/I_0(N)$ при концентрации борной кислоты $C = 1$ мг/л.

Мы видим последовательность импульсов зондирующего лазерного излучения $I(N)$ по отношению к величинам импульсов зондирующего лазерного излучения $I_0(N)$, прошедших через эталонную кювету с нулевой концентрацией борной кислоты $C = 0$: $I(N)/I_0(N)$. Данные импульсы зондирующего лазерного излучения регистрируются фотоприемником после каждого прохождения зондирующего импульса по измерительной кювете I . Отдельно регистрируются импульсы $I_0(N)$ после прохождения по эталонной кювете. При этом относительная величина импульсов зондирующего лазерного излучения $I(N)/I_0(N)$ постепенно уменьшается с ростом числа оборотов N по измерительной кювете I . Число оборотов (прохождений) по измерительной кювете возрастает от одного до N . При числе оборотов $N = 10$ величина регистрируемого импульса $I(10)$ составляет 0,848 от величины импульса $I_0(0)$, регистрируемого при нулевой концентрации борной кислоты (в эталонной кювете) – изменение на 15,2%. Итак, уже при $N = 10$ возможны точные измерения концентрации борной кислоты порядка $C = 1$ мг/л. При $N = 20$ указанное изменение (уменьшение) амплитуды импульса составляет величину 0,72 от уровня импульса при нулевой концентрации борной кислоты (уменьшение на 28%), что позволяет осуществить процесс измерений с

ещё более высокой точностью. При однократном проходе зондирующего импульса $I(1)$ через измерительную кювету уменьшение амплитуды относительно нулевого импульса $I_0(0)$ составит 0,9837, т.е. менее одного процента, что не позволяет обеспечить высокую точность измерений только при одном проходе зондирующего импульса через измерительную кювету, что характерно для классического абсорбционного метода.

Таким образом, представленный на рис.2 результат показывает постепенное увеличение чувствительности и точности измерений при увеличении числа проходов N зондирующего лазерного излучения по измерительной кювете. Представленные на рис.3 и рис.4 результаты моделирования измерений концентраций борной кислоты 0,2 мг/л и 0,05 мг/л, показали определенную возможность достаточно точного определения этих малых уровней концентраций.

Так например, при измерении весьма малой концентрации $C = 0,05$ мг/л уровень уменьшения амплитуды зондирующего импульса $I(N)$, который необходимо зарегистрировать при $N = 30$ после осуществления тридцати оборотов зондирующего импульса по измерительной кювете, составляет $E_p = 0,975$, т.е. 2,5%. Современные цифровые средства измерения амплитуд электрических импульсов достаточно надежно обеспечивают данную точность измерений, что соответственно обеспечивает достаточную точность измерения весьма малой концентрации борной кислоты в составе контура теплоносителя ядерного реактора.

Следует отметить, что при переходе от измерений малой концентрации борной кислоты к измерениям более высокой концентрации целесообразно изменить рабочую длину волны, генерируемую лазерным генератором 4 и использовать более длинноволновое лазерное излучение ультрафиолетового диапазона.

Это позволит более точно согласовать характеристики фотоприемника с характеристиками поглощения излучения в теплоносителе с более высокой концентрацией борной кислоты и обеспечит более высокую точность измерений. В настоящее время промышленностью освоены лазерные генераторы видимого и ультрафиолетового диапазона длин волн с перестройкой длины волны генерируемого излучения.

Соотношение (15) показывает, что концентрацию C можно определить, осуществляя сравнение любых двух импульсов лазерного излучения, имеющих известную разность прошедших оборотов по кольцу обратной связи, т.е. имеющих известное различие в пройденном пути через слой измеряемого вещества. В случае первого и N -го импульсов различие в числе оборотов равно $N - 1$.

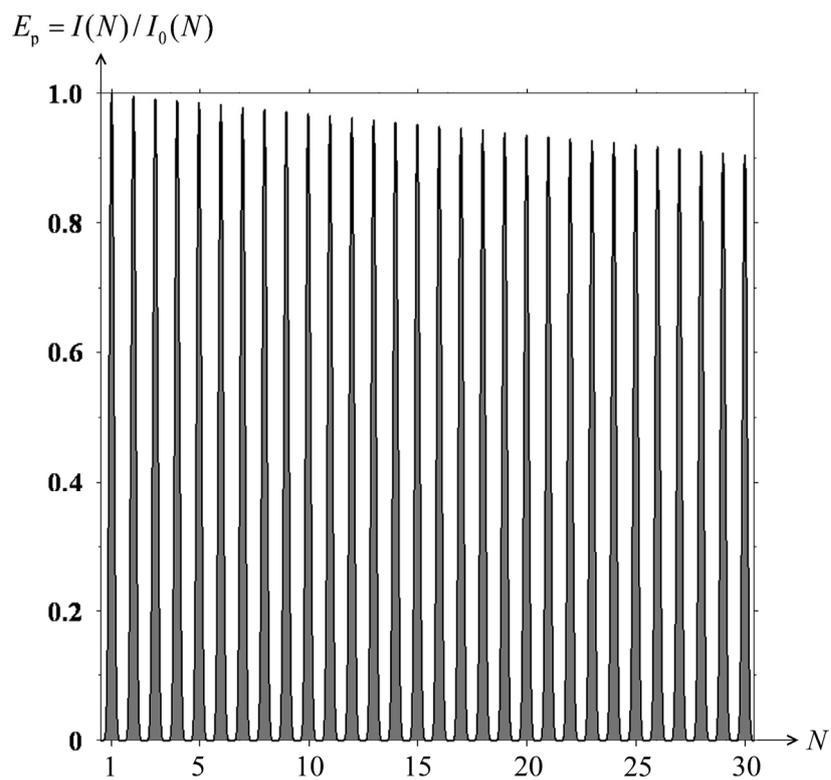


Рис.3. Величина $I(N)/I_0(N)$ при концентрации борной кислоты 0,2 мг/л.

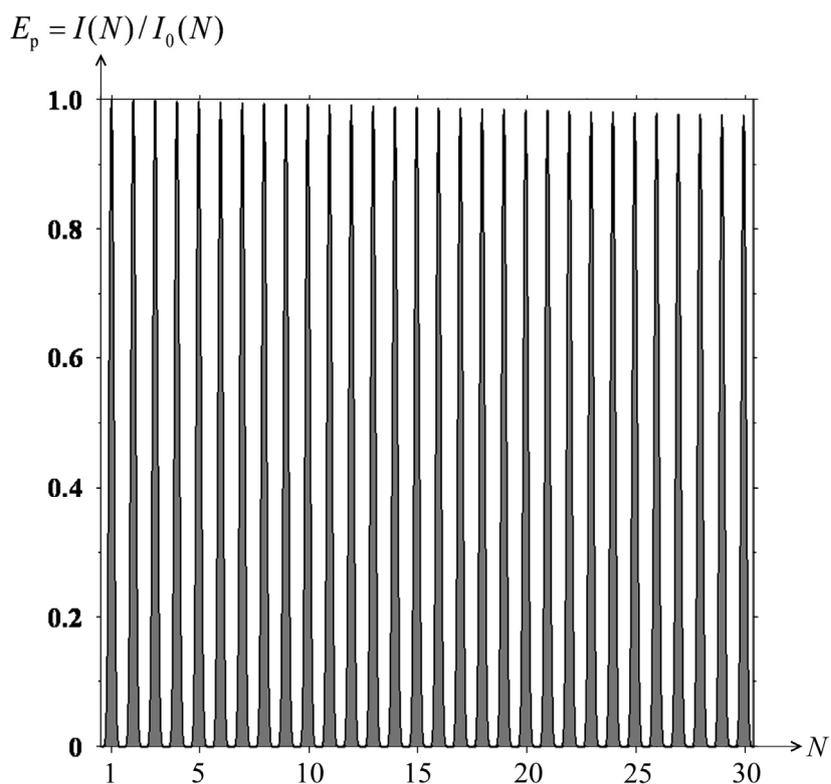


Рис.4. Величина $I(N)/I_0(N)$ при концентрации борной кислоты $C = 0,05$ мг/л.

При этом в (15) учитывается и компенсируется величина пропускания T_1 по кольцу оптической обратной связи в степени числа оборотов по кольцу N . При пропускании, равном единице, то есть при отсутствии поглощения в кольце обратной связи, измерения становятся идеальными, и в формуле (15) присутствуют только величины измеренных амплитуд лазерных импульсов, прошедших различное расстояние и число оборотов по кольцу обратной связи.

Таким образом, изложенные два метода определения концентрации C по формулам (9) и (14) позволяют реализовать измерение как больших, так и весьма малых концентраций борной кислоты и обеспечить реализацию требований к измерительной системе, предъявляемых в современной ядерной энергетике. Согласно изложенным двум методам измерений концентрации C в вычислительном блоке – компьютере 14 регистрируется и накапливается набор оценок амплитуд лазерных импульсов $I(N)$, прошедших через измерительную кювету и совершивших от одного до N оборотов по кольцу оптической обратной связи. В вычислительном блоке вычисляется соответствующая оценка величины концентрации C , которая может быть сделана для каждого зарегистрированного зондирующего лазерного импульса. Анализ полученного набора оценок концентрации C позволяет повысить точность измерений и достоверность получаемой информации. На точность полученных оценок концентрации C влияет точность определения параметров элементов оптической схемы, измерение которых с высокой степенью точности не представляет трудностей.

Второй и последний фактор, влияющий на точность определения концентрации C изложенными методами является фактор точности определения отношения амплитуд импульсов лазерного излучения фотоприемником 13. Эта точность определяется параметрами фотоприемника и величинами уровней поступающих импульсов зондирующего излучения. В настоящее время существуют фотоприемные устройства, работающие в УФ диапазоне (до 200 нм), имеющие высокую чувствительность порядка единиц фотонов в принимаемом импульсе лазерного излучения [13]. Для реализации высокой точности измерений с помощью данных фотоприемных устройств необходимо обеспечить формирование измеряемых лазерных импульсов с энергией в импульсе, превосходящей уровень собственных шумов и флуктуаций данного фотоприемника в 10 и более раз. При использовании лазерного генератора УФ диапазона соответствующей мощности достижение режима превышения уровня пороговой чувствительности современных ФЭУ и реализация высокой точности измерений амплитуд им-

пульсов порядка одного процента от измеряемой амплитуды вполне достижима и не представляет больших технических проблем.

Определение концентрации борной кислоты в измерительной кювете I основано на соотношении (9), в котором учтены все факторы, влияющие на процесс измерения. Для осуществления измерения концентрации C по данной формуле необходимо регистрировать величину лазерного импульса $I(N)$, прошедшего по кольцу оптической обратной связи N оборотов. Амплитуда этого импульса после проходов N , определяется величиной зондирующего лазерного импульса I_0 , параметрами оптической схемы, пропусканием по кольцу обратной связи за N проходов и поглощением излучения при прохождении через раствор борной кислоты с искомой измеряемой концентрацией C (см. формулу (9)). Последняя составляющая поглощения, как было отмечено, пропорциональна величине $\exp(KNLC)$. Соотношение (9) позволяет определить технические требования к аппаратуре измерительной системы для обеспечения процесса измерения заданных малых значений концентрации C с приемлемой точностью измерений. Как было отмечено выше, величина произведения KL под знаком экспоненты определяет чувствительность абсорбционного метода измерений. Поэтому увеличение числа проходов зондирующего лазерного импульса напрямую увеличивает чувствительность предлагаемого метода измерений. Для реализации и обеспечения этого метода следует только осуществить регистрацию и измерение лазерного импульса из соотношения (9), прошедшего N оборотов по кольцу, с помощью фотоприемника $I3$ с достаточной точностью. Для этого необходимо выполнить единственное условие: обеспечить существенное превышение величины уровня принимаемого лазерного импульса над уровнем собственных шумов фотоприемника. Таким образом, осуществив выбор высокочувствительного фотоприемника и достаточно мощного лазерного генератора можно обеспечить высокую чувствительность и точность измерения малых концентраций борной кислоты предлагаемым методом измерений.

Представим оценку требований к параметрам лазерного генератора и чувствительности фотоприемника. Обозначим символом E_0 пороговую чувствительность фотоприемника $I3$, которая равна, например, трехкратному превышению величины уровня принимаемого лазерного импульса над уровнем собственных шумов фотоприемника. Данный уровень достаточен для обнаружения лазерного импульса, как это осуществляется в лазерной локации [14, 15], но недостаточен для точного измерения амплитуды (уровня) принимаемого лазерного

импульса. Для точного измерения величины уровня лазерного импульса необходимо увеличить энергию лазерного импульса в 10 и более раз. Обозначим символом $E_1 = nE_0$ уровень принимаемого лазерного импульса, достаточный для точного измерения величины этого импульса современными техническими средствами, например, с точностью порядка 10%. Величина E_1 может превосходить уровень пороговой чувствительности в n раз, где $n = 10 - 100$ и более. Тогда величина отношения параметров выбранного лазерного генератора и фотоприемника

$$B = I_0 / E_1. \quad (17)$$

характеризует потенциал измерительной системы. Здесь величины I_0 и E_1 измеряются в числах фотонов в генерируемом импульсе лазерного генератора, а также в принимаемом лазерном импульсе $I(N)$. Возможно также измерение величин лазерных импульсов в единицах энергии в импульсе. Величина B характеризует возможный (допустимый) уровень ослабления импульса лазерного излучения $I(N)$ при его многократном прохождении по кольцу оптической обратной связи. Отсюда подставляя в соотношение (8) вместо $I(N)$ его предельную величину E_1 , также выраженную в числах фотонов, и с учетом взаимосвязи I_0 и E_1 через указанную величину B , получаем следующее соотношение для определения потенциальных возможностей предлагаемой измерительной системы:

$$1/B = T_{11}T_{12}T_1^N \exp(-KCNL). \quad (18)$$

Соотношение (18) позволяет при заданных или выбранных значениях потенциала измерительной системы B (17), длины измерительной кюветы L , коэффициента поглощения K , параметров оптической системы T_{11} и T_1 , T_{12} определить возможное предельное число оборотов зондирующего лазерного импульса по кольцу оптической обратной связи N и минимальную концентрацию C борной кислоты, измеряемую в системе измерений с приемлемой заданной точностью измерений. На основании данной полученной формулы была проведена оценка потенциальных возможностей системы измерений по определению малых концентраций борной кислоты в составе теплоносителя. Следует отметить, что уравнение (18) невозможно решить относительно числа оборотов N , кроме как численными методами. Поэтому на основании полученного соотношения (18) проведена оценка величины потенциала измерительной системы B (17), которое необходимо обеспечить при выборе лазерного генератора и фотоприемника для ис-

пользования в конкретной измерительной системе, предназначенной для осуществления измерений концентрации борной кислоты в составе теплоносителя ядерного реактора:

$$B = \exp(KCLN) / T_{11}T_{12}T_1^N. \quad (19)$$

В формулу (19) для оценки величины потенциала B следует подставлять вместо C необходимую минимальную величину измеряемого уровня концентрации борной кислоты C_{\min} , величины пропускания элементов оптической системы T , и выбранное число проходов зондирующего излучения по цепи оптической обратной связи N , а также известные длину измерительной кюветы L и коэффициент поглощения K .

На основании соотношения (19) определим требования к лазерному генератору УФ диапазона для обеспечения реализации чувствительности измерительной системы и осуществления N оборотов зондирующего лазерного излучения, в соответствии с представленной выше табл.1. Положим величину потерь излучения за один проход по кольцу оптической обратной связи равной 40%, что соответствует величине пропускания по кольцу обратной связи $T_1 = 0,6$. Одновременно выберем величины пропускания полупрозрачных зеркал $T_{11} = T_{12} = 0,05$. Тогда для минимального уровня измеряемой концентрации $C = 0,05$ мг/литр и числа оборотов $N = 30$ из (19) получим следующее значение потенциала измерительной системы B : $B = 2 \times 10^9$. Далее в соответствии с соотношением (17) получаем величину уровня необходимой энергии генерируемого импульса зондирующего лазерного излучения $I_0 = BE_1$. Для выбранной пороговой чувствительности ФЭУ $E_1 = 10^4$ фотонов в импульсе принимаемого зондирующего лазерного излучения $I_0 = BE_1 = 2 \times 10^{13}$ фотонов, что для длины волны УФ диапазона равной 220 нм соответствует энергии в импульсе зондирующего лазерного излучения равной 0,02 мДж (энергия одного фотона для указанной длины волны равна 9×10^{-19} Дж). Таким образом, указанная в табл.1 высокая чувствительность измерительной системы $C = 0,05$ мг на литр вещества теплоносителя достигается при весьма малой энергии в зондирующем импульсе – менее одной десятой мДж. Следовательно, представленные в табл.1 результаты моделирования измерительного процесса предлагаемого метода измерений не являются предельными возможностями данного метода, так как современной промышленностью освоено производство лазерных генераторов УФ диапазона с энергией от одного до десяти джоулей в импульсе излучения. Следует отметить,

что принятый при данном анализе уровень чувствительности ФЭУ в УФ диапазоне 10^4 фотонов в импульсе более чем в 100 раз превосходит уровень предельной квантовой чувствительности данных приборов и позволяет с высокой точностью измерять энергию регистрируемых импульсов зондирующего лазерного излучения, совершивших N оборотов по кольцу оптической обратной связи.

В соответствии с изложенной методикой проведено моделирование работы измерительной системы при дальнейшем увеличении количества оборотов N зондирующего лазерного излучения по цепи оптической обратной связи. При этом определены потенциальные возможности предложенного метода измерений концентрации борной кислоты в контуре теплоносителя ядерного реактора. Определены требуемые для этого параметры лазерного генератора УФ излучения. Полученные результаты представлены в табл.3.

Таблица 3.

N	30	40	50	60
C , мг/л	0,05	0,03	0,01	0,005
I_0 , мДж	0,02	2,7	450	72000

Представленные в табл.3 результаты показывают, что при увеличении количества оборотов N зондирующего лазерного излучения по цепи оптической обратной связи возрастает необходимый уровень энергии излучения, генерируемого лазерным генератором. Это обусловлено существенным увеличением потерь в оптической схеме при увеличении числа оборотов N . При значениях пропускания элементов оптической измерительной схемы, приведенных выше, величина минимального измеряемого уровня концентрации борной кислоты C_{\min} составляет 0,01 мг/л вещества теплоносителя. Данная чувствительность измерительной системы достигается при осуществлении измерения зондирующего лазерного импульса, совершившего 50 оборотов по цепи оптической обратной связи. Для реализации ещё более высокой чувствительности измерительной системы – при наличии такой необходимости – следует использовать лазерный генератор более высокой мощности – до 72 Дж в импульсе генерируемого лазерного излучения при 60 оборотах по цепи оптической обратной связи. Повышение чувствительности системы измерений может быть достигнуто также путем уменьшения оптических потерь в цепи оптической обратной связи.

Полученные результаты свидетельствуют о возможности и перспективности измерений концентрации борной кислоты предлагаемым абсорбционным методом с использованием представленной системы фотометрических измерений в ультрафиолетовом диапазоне длин волн. Предлагаемый метод и система измерений обеспечивает измерение больших концентраций борной кислоты порядка десятков граммов на литр вещества теплоносителя. Одновременно предлагаемая система измерений обеспечивает осуществление измерений малых концентраций борной кислоты до величин 0,5 – 0,01 мг/л вещества теплоносителя. Данная высокая чувствительность при измерении малых концентраций исследуемых веществ достигается за счет осуществления многократного прохождения зондирующего лазерного излучения через измерительную кювету с помощью организации оптической обратной связи, включающей измерительную кювету с исследуемым веществом. В результате этого чувствительность используемого абсорбционно-спектрального метода измерений возрастает в N раз, где N – число оборотов зондирующего лазерного излучения по кольцу оптической обратной связи, включающего и измерительную кювету. Таким образом, предлагаемый метод измерений позволяет осуществить измерение концентрации борной кислоты в большом диапазоне от десятков граммов на литр вещества теплоносителя до 0,05 миллиграммов на литр. Минимальная чувствительность системы измерений составляет $C = 0,01$ мг/л. Диапазон измерений составляет величину 10^6 . Следует отметить, что предлагаемый абсорбционно-оптический метод измерения концентрации борной кислоты существенно превышает по чувствительности известный радиационный метод измерения концентрации борной кислоты в составе теплоносителя ядерного реактора. Указанный радиационный метод обладает чувствительностью порядка 0,1% по весу [3, 10 (С.С. 104 – 106)], т.е. порядка одного грамма на литр вещества теплоносителя, что в 10^5 раз меньше чувствительности рассмотренного абсорбционно-оптического метода измерений концентрации борной кислоты.

Предлагаемый метод оптических измерений позволяет осуществлять измерение концентрации борной кислоты оперативно в реальном времени непосредственно в первом и последующих контурах теплоносителя ядерного реактора. Для проведения таких измерений используется измерительная кювета, подключенная к контуру теплоносителя посредством специального байпасного трубопровода. Возможен второй вариант осуществления фотометрического метода измерения концентрации борной кислоты в составе теплоносителя контура

ядерного реактора, не требующий применения врезки проточной измерительной кюветы непосредственно в контур теплоносителя.

Согласно второму варианту измеряемое рабочее вещество из контура теплоносителя ядерного реактора подается в измерительную кювету с прозрачными окнами по специальному дополнительному трубопроводу (ответвлению) с выхода пробоотборного устройства ядерного реактора, которое существует и используется в ядерном реакторе для получения пробы вещества теплоносителя и использования этой пробы в химическом методе определения концентрации борной кислоты в контуре теплоносителя ядерного реактора. При этом вещество теплоносителя в измерительную оптическую кювету подается через дополнительный трубопровод посредством автоматического дистанционно-управляемого клапана. После осуществления измерения концентрации борной кислоты в оптической измерительной кювете, осуществляется слив вещества теплоносителя из данной измерительной кюветы в специальную ёмкость для дальнейшей утилизации с помощью второго выпускного дистанционно-управляемого клапана. Таким образом, наполнение измерительной оптической кюветы веществом теплоносителя из контура ядерного реактора осуществляется без контакта персонала АЭС с измерительной аппаратурой и полученным материалом пробы. При этом не требуется осуществления специального прямого подключения (врезки) измерительной оптической кюветы к контуру теплоносителя.

5. Обсуждение результатов

Использование предлагаемого метода и системы измерения в составе ядерного энергетического реактора позволяет реализовать следующие преимущества и обеспечить решение следующих проблем в области эксплуатации современных ядерных реакторов.

1) Обеспечение возможности проведения контроля состава теплоносителя непосредственно в контуре ядерного реактора при действующих параметрах водной среды. При этом возможно определение концентрации не только борной кислоты, но и других возможных примесей, образующихся при длительной работе ядерного реактора и воздействия радиации. Для обнаружения указанных примесей возможно использование всего спектра лазерного излучения от короткого ультрафиолета до инфракрасного излучения, способного распространяться в водной среде.

2) В необслуживаемых и полубслуживаемых помещениях первого контура (зона строгого режима) устанавливаются только измерительные кюветы. Вспомогательное оборудование измерительной системы и устройства отображения информации могут быть вынесены в любое помещение АЭС на расстояние порядка 1000 метров от ядерного реактора за счет использования волоконно-оптической линии связи. Такая структура при высоком ресурсе работы измерительных кювет позволит снизить дозовые нагрузки обслуживающего персонала АЭС.

3) Применение предлагаемой системы измерений исключает необходимость в осуществлении отбора пробы теплоносителя из среды первого контура. Это обеспечивает снижение дозовых нагрузок персонала АЭС и исключается сброс радиоактивных сред, получаемых при отборе пробы из первого контура.

4) Выведение из процесса измерения человека (что характерно для хемолуминесцентных методов измерений с отбором пробы) исключает субъективную случайную погрешность измерений. Значительно улучшаются метрологические характеристики измерений вследствие отсутствия транспортного запаздывания пробы в длинных импульсных линиях, повышается оперативность измерений, что имеет большое значение для системы управления ядерным реактором и повышения безопасности работы атомных электрических станций.

Предлагаемый метод измерений и измерительная система вследствие высокой точности измерений, широкого диапазона измерений концентраций исследуемых веществ и высокой оперативности выполнения измерений найдет применение в ядерной энергетике, а также в химической, нефтеперерабатывающей промышленности и системах мониторинга окружающей среды и экологического контроля.

6. Заключение

В настоящей работе рассмотрены вопросы использования абсорбционно-спектрального метода измерений для оперативного исследования характеристик теплоносителя в контуре охлаждения ядерного водо-водяного энергетического реактора.

Предложено осуществлять измерение параметров теплоносителя оперативно путем просвечивания вещества теплоносителя лазерным излучением и измерения прошедшего через теплоноситель зондирующего излучения посредством специальной высокочувствительной оптической измерительной системы.

Для осуществления оптических измерений теплоносителя используется измерительная проточная кювета, подключенная к контуру теплоносителя посредством байпасного трубопровода.

Проведено экспериментальное исследование характеристик борной кислоты в растворах, соответствующих по своим параметрам растворам борной кислоты в составе теплоносителя ядерного реактора. Определены параметры поглощения борной кислотой ультрафиолетового излучения и измерен коэффициент поглощения борной кислоты в наиболее короткой части УФ диапазона, где поглощательная способность борной кислоты является наибольшей.

Показано, что чувствительность классического абсорбционного метода измерения борной кислоты является невысокой и не позволяет обеспечить в полном объеме требования к производству измерений в составе ядерного реактора. Предложена модификация абсорбционного метода измерений концентрации борной кислоты в составе контура ядерного реактора. Модификация метода основана на обеспечении многократного прохождения зондирующего лазерного излучения по кольцу оптической обратной связи, включающему измерительную кювету.

Проведены исследования предложенного модифицированного метода измерения концентрации борной кислоты с использованием проточной измерительной кюветы. Показано, что чувствительность предложенного метода измерений увеличивается пропорционально числу оборотов зондирующего излучения по кольцу оптической обратной связи. По результатам проведенного моделирования определена предельная чувствительность предложенного метода измерений. Минимальная измеряемая величина концентрации борной кислоты составляет $C_{\min} = 0,01$ миллиграмма на литр вещества теплоносителя. Проведенные исследования показали возможность реализации предлагаемого метода и измерительной системы на основе современной аппаратуры, освоенной промышленностью, перспективность использования предложенного метода в современной ядерной энергетике, а также перспективность использования метода в различных областях промышленности и исследовании окружающей среды.

ЛИТЕРАТУРА

1. Физические величины (справочник) // Под ред. И.С. Григорьева, Е.З. Мейлихова. М.: Энергоатомиздат, 1991.
2. *Физико-химические методы исследования внутриконтурных химических процессов в системах атомных энергетических установок.* ЦНИИАТОМИНформ, 1986.
3. Бовин В.П. *Нейтронно-абсорбционный анализатор Бора в теплоносителе первого контура ВВЭР.* Атомная энергия, 1976. Т. 38, Вып. 5, С. 283 – 286.
4. Патент РФ № 2025800 от 30.12.1994. *Способ контроля содержания Бора-10 в теплоносителе первого контура ядерного реактора.*
5. Патент РФ № 2175792 от 20.02.2001. *Измерительное устройство для определения концентрации бора.*
6. *Химический контроль на тепловых и атомных станциях.* М.: Наука, 1980.
7. Эрнстова Д.И., Броучек Ф.И. *Аналитические методы определения бора.* Тбилиси, 1965.
8. Немодрук А.А., Карамова З.К. *Аналитическая химия бора.* М.: Наука, 1964.
9. Марченко З.И. *Фотометрическое определение элементов.* М.: Мир, 1976.
10. Тельдешви Ю. *Детективы атомного века.* М. Атомиздат. 1977г.
11. Манкевич С.К., Орлов Е.П. Система измерения концентрации борной кислоты в первом контуре теплоносителя ядерного энергетического реактора. Заявка на изобретение РФ № 2015117965, приоритет 14.05.2015г. Опубликовано 10.10.2015г. Бюлл.изобретений №28.
12. *Физический энциклопедический словарь* // Под ред. А.М. Прохорова. М.: Советская энциклопедия, 1984. (С.С. 60, 862).
13. *Справочник по лазерной технике.* // Под редакцией Напартовича А.П. М.: Энергоатомиздат, 1991.
14. Кутаев Ю.Ф., Манкевич С.К., Носач О.Ю., Орлов Е.П. Патент РФ № 2152056 от 27.06.2000. *Способ лазерной локации и устройство для его осуществления.*
15. Кутаев Ю.Ф., Манкевич С.К., Носач О.Ю., Орлов Е.П. Патент РФ № 2248555 от 20.03.2005. *Способ определения характеристик лазерной среды и устройство для его осуществления.*

Евгений Прохорович ОРЛОВ
Сергей Константинович МАНКЕВИЧ

**Абсорбционно-спектральный метод контроля характеристик
теплоносителя в ядерном энергетическом реакторе**

Формат 60x84/16. Бумага офсетная. Печать офсетная. Тираж 140 экз. Заказ №53. П.л.2,25
Отпечатано с оригинал-макета заказчика в типографии РИИС ФИАН
119991 Москва, Ленинский проспект 53