

А. Я. Кириченко, Г. В. Голубничая

**ИДЕНТИФИКАЦИЯ ПИТЬЕВОЙ ВОДЫ ПРИРОДНЫХ ИСТОЧНИКОВ  
ХАРЬКОВСКОГО РЕГИОНА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕМПЕРАТУРНОЙ ЗАВИСИМОСТИ  
ИХ КОЭФФИЦИЕНТА ПРЕЛОМЛЕНИЯ**

*Институт радиофизики и электроники им. А. Я. Усикова НАН Украины  
12, ул. Ак. Проскуры, Харьков, 61085, Украина  
E-mail: [kharkovs@ire.kharkov.ua](mailto:kharkovs@ire.kharkov.ua)*

С использованием метода колеблющейся струны в мм диапазоне длин волн исследованы коэффициенты преломления и их температурные зависимости серии образцов питьевых вод из разных источников. Установлено, что температурную зависимость коэффициентов преломления в исследованном диапазоне температур можно с достаточной точностью аппроксимировать прямой. Показано, что с помощью определения коэффициента прямолинейной регрессии температурной зависимости коэффициента преломления можно установить принадлежность образца питьевой воды к тому или другому источнику. Ил. 4. Табл. 1. Библиогр.: 4 назв.

**Ключевые слова:** метод колеблющейся струны, диэлектрическая проницаемость, вода.

В окружающем нас пространстве вода в природных условиях всегда представляет собой слабые многокомпонентные растворы солей, газов и взвешенных органических веществ. В быту нами используется пресная вода с концентрацией солей до 1 г на 1 кг воды. Химический анализ растворенных в воде веществ – весьма длительный и кропотливый процесс и требует специального химического оборудования. В то же время часто возникает необходимость в быстрой идентификации питьевой воды, принадлежащей к тому или другому природному источнику. В этом случае может помочь определение интегральной характеристики водного раствора слабой концентрации, какой является его диэлектрическая проницаемость  $\epsilon$  или коэффициент преломления  $n$  совместно с использованием температурной зависимости их диэлектрической постоянной (или коэффициента преломления).

Естественно, в слабом водном растворе основной вклад в измеряемые электрические характеристики вносит вода – жидкость, обладающая высокими электромагнитными потерями, что предъявляет соответствующие требования к методам измерения ее диэлектрических свойств. Ввиду этого изменение диэлектрической проницаемости раствора при невысоких концентрациях растворяемого вещества необходимо наблюдать на фоне высоких значений диэлектрической постоянной воды.

Постоянная составляющая диэлектрической проницаемости на сверхвысоких частотах заметно снижается с увеличением частоты, и, по утверждению авторов работы [1], мм волны менее чувствительны к солям в водном растворе, чем см, что может затруднять возможность определения различий слабых водных растворов, которыми является питьевая вода из различных источников. Так, в исследованиях проб морской воды с соленостью  $S \leq 2,4\%$ , взятых из разных акваторий, зна-

чения коэффициента преломления  $n$  в мм диапазоне волн близки к значению для дистиллированной воды, и различия не выходят за пределы средней квадратичной ошибки измерения [2]. В этой работе измерения выполнены в свободном пространстве путем регистрации коэффициентов отражения и прохождения на сложной установке квазиоптического типа, также проведено детальное изучение погрешностей измерения. Однако, как показано, метод, использующий возмущение образцом воды диэлектрического квазиоптического резонатора, позволяет уверенно наблюдать различия в диэлектрических свойствах морской воды и дистиллированной [3].

Задача настоящих исследований заключается в создании диэлектрической ячейки для измерений, которая позволяет непосредственное измерение коэффициента преломления без использования резонансных или волноводных методов, требующих решения прямой и обратной электродинамических задач при определении диэлектрических характеристик слабых водных растворов. При этом предполагается упростить схему и увеличить скорость измерений. Определение абсолютного значения коэффициента преломления или комплексного значения диэлектрической проницаемости, учитывая сложности в точном измерении диэлектрических характеристик слабых водных растворов (даже при использовании резонансных измерительных ячеек), при создании и изучении нового устройства не представляло первоочередной задачи. Ввиду слабого различия в диэлектрических характеристиках воды с низкой концентрацией солей необходимо было разработать также новую методику обработки результатов, которая дает возможность идентифицировать питьевую воду, различающуюся составом растворенных в ней солей с  $S \leq 1\%$ .

**1. Применяемая методика измерений.**  
Для непосредственного измерения коэффициента

преломления слабого водного раствора, каким является питьевая вода, была использована методика колеблющейся металлической струны [4]. Достоинством метода является непосредственное измерение длины волны  $\lambda$  в растворе, т. е. фактически коэффициента преломления  $n = \lambda/\lambda_0$ , где  $\lambda_0$  – длина волны в свободном пространстве. Следует отметить, что широко известные методы измерения электрических характеристик веществ (резонаторный, волноводный и метод измерения в свободном пространстве) позволяют определять диэлектрические характеристики веществ лишь опосредствовано – через изменения резонансных частот и добротностей или через измерение коэффициентов отражения или прохождения волны через слой диэлектрика. К сожалению, область применения предлагаемой методики измерений ограничивается мм волнами.

Схематически устройство, использующее рассматриваемый метод, представлено на рис. 1.

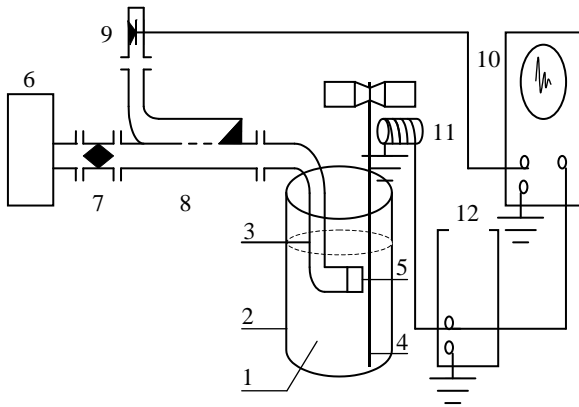


Рис. 1. Блок-схема измерительного стенда для определения диэлектрических свойств жидкостей

Тестируемый раствор 1 находится в контейнере 2. В растворе располагается открытый конец прямоугольного волновода 3, защищенный от проникновения жидкости внутрь волновода заглушкой из фторопласта 5. Открытый конец волновода является излучателем частоты  $\omega = 2\pi f$ , длина волны которой лежит в области мм диапазона волн. Часть стальной струны перед волноводом располагается в жидкости параллельно вектору напряженности электромагнитного поля. Волновод запитывается клистронным генератором 6. В цепь питания излучателя включены установочный аттенюатор 7 и направленный ответвитель 8. Ответвитель, измерительное плечо которого нагружено кристаллическим детектором 9, принимает сигнал, отраженный от открытого конца волновода и металлической струны, расположенной перед ним. Сигнал с детектора подается на вертикально отклоняющие пластины изме-

рительного осциллографа 10. Стальная струна 4 приводится в колебательное движение в  $E$ -плоскости излучения из излучателя электромагнитом 11, питаемым сигналом звукового генератора 12 с частотой  $\Omega$ . Отраженный сигнал при этом представляет собою интерференцию двух отраженных сигналов (постоянного во времени, отраженного от торца волновода, и переменного – от вибрирующей струны). В детекторный приемник 9 поступает суммированный сигнал от неоднородности в виде открытого конца волновода  $A_0 = e^{i\omega t}$ , т. е. опорный сигнал, и изучаемый сигнал, отраженный от колеблющейся струны  $\tilde{A} = B(1 + m \cos \Omega t) e^{i(\omega t + \vartheta)}$ . За счет их интерференции сигнал на экране осциллографа имеет вид осциллирующей с частотой  $2\Omega$  кривой с изменяющейся амплитудой  $A_{\Sigma 2} = 2A_0 \tilde{A}(1 + m \cos \Omega t) \cos \vartheta$ .

На рис. 2 представлен вид этой кривой, полученной на экране осциллографа при колебании струны в воздухе.

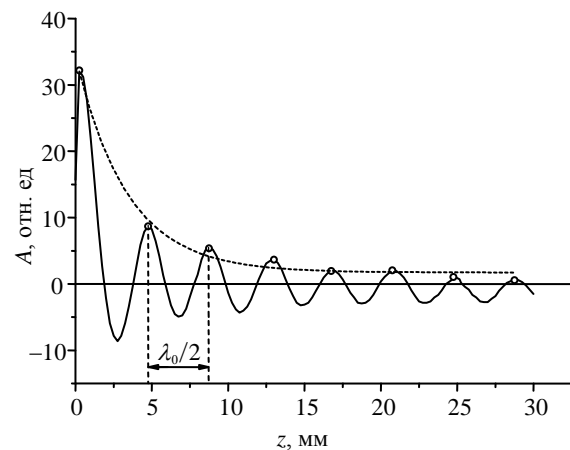


Рис. 2. Осциллограмма зависимости интенсивности отраженного сигнала от положения колеблющейся струны в воздухе при перемещении струны от среза волновода в направлении излучения

Расстояние между соседними максимумами (или минимумами) этой кривой соответствует половине длины волны, распространяющейся в воздухе ( $\lambda_0/2$ ). При размещении излучателя и струны в измеряемой жидкости это расстояние равно  $\lambda_\epsilon/2$ . Отношением этих расстояний определяется показатель преломления измеряемой жидкости  $n = \lambda_0/\lambda_\epsilon$ . Измерение расстояний производится микрометром при механическом перемещении колеблющейся струны относительно излучателя в направлении излучения волны. На снижение амплитуды колебаний при удалении струны от излучателя сказывается как этот фактор (что отражено на кривой, полученной в воздухе, рис. 2), так и поглощение электромагнитно-

го излучения в измеряемой жидкости. Высокие поглощающие свойства воды обедняют осциллограмму, приведенную на рис. 2, в результате чего на ней наблюдается всего 1,5 – 2 колебания (рис. 3), что снижает точность измерения длины волны в слабых водных растворах.

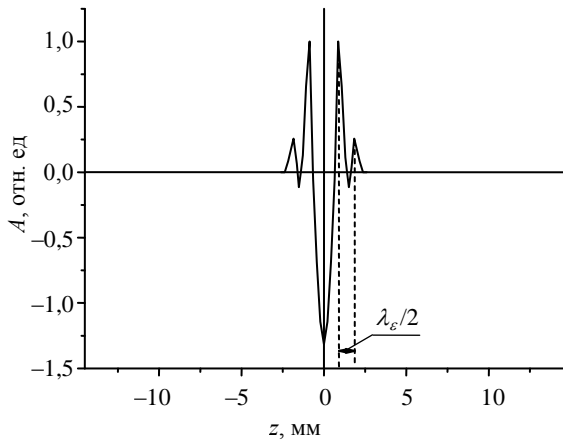


Рис. 3. Осциллограмма зависимости отраженного сигнала от положения колеблющейся струны в воде при отклонении ее к срезу волновода ( $-z \div 0$ ) и от среза ( $0 \div +z$ )

**2. Результаты измерений.** Для исследования коэффициента преломления источников питьевой воды Харьковского региона были взяты родниковые воды и воды из глубоководных артезианских источников: вода минеральных источников, добываемая из скважин – «Роганская» (из глубины 700...800 м) и «Рай-Еленовская» (из глубины 65...79 м); «Шестаковская-кремниевая» и «Шатиловская – Харьков-1». Для сравнения проводились также измерения  $n$  дистиллированной воды и воды из харьковской водопроводной сети. Различие в коэффициентах преломления  $n$  всех четырех изучаемых образцов питьевой воды достигает всего лишь  $\Delta n/n \sim 6\%$  в пределах температурных границ проводимых исследований. При температуре  $T = 14\text{ }^\circ\text{C}$  в зависимости от вида образца измеренное  $n$  лежит в интервале  $4,9 \leq n \leq 5,2$ , а при  $T = 21\text{ }^\circ\text{C}$  – в интервале  $5,3 \leq n \leq 5,6$ . Таким образом, различие в коэффициентах преломления изучаемых образцов воды небольшое и сравнимо с точностью измерения используемого метода. Наряду с этим отмечается четкое увеличение коэффициента преломления всех четырех образцов питьевой воды с повышением температуры и, по-видимому, с различием в скорости изменения с температурой  $\Delta n/\Delta T$ . Так, например, коэффициент преломления «свежей» (непосредственно сразу из под крана) водопроводной воды при температуре ниже  $18\text{ }^\circ\text{C}$  меньше значения  $n$  всех изучаемых образцов воды, однако с повышением температуры ее коэффициент преломления быстро

возрастает и превышает значение  $n$  остальных образцов воды при  $T \geq 21\text{ }^\circ\text{C}$ .

Слабые отличия коэффициентов преломления исследуемых водных растворов привлекли внимание к различиям в скорости изменения  $n$  с изменением температуры. С этой целью ввиду небольшого температурного интервала логично было использовать коэффициент линейной регрессии  $R$  при изменении температуры. Из результатов измерения электрических свойств дистиллированной воды на длине волны 8 мм, приведенных в работе [1], а также в других публикациях этих авторов, коэффициент линейной регрессии дистиллированной воды в интервале  $20...30\text{ }^\circ\text{C}$  составляет  $R = 0,05727$ . Настоящими измерениями для дистиллированной воды установлено, что  $R \leq 0,060$ .

Предполагалось, что совместное использование измерений  $n$  и коэффициента линейной регрессии  $n(T)$  исследуемых образцов могло бы позволить повысить достоверность в различии слабых водных растворов. Действительно, несмотря на низкую концентрацию растворенных примесей в изучаемых водных растворах, коэффициенты прямолинейной регрессии  $R$  коэффициента преломления с изменением температуры  $n(T)$  оказались различными. На рис. 4 представлены зависимости коэффициента преломления изучаемых образцов воды от температуры, измеренные в интервале  $13...21\text{ }^\circ\text{C}$ , а также линии прямолинейной регрессии.

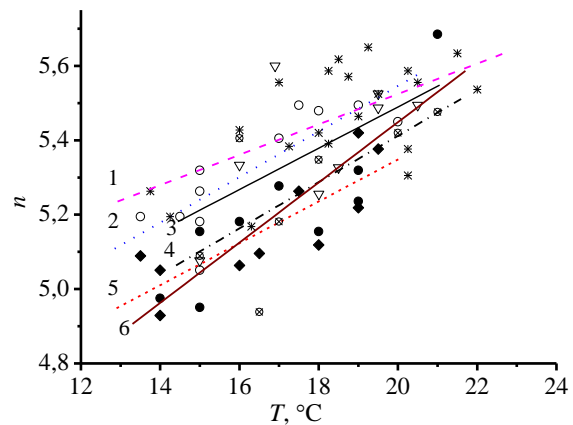


Рис. 4. Линейные регрессии температурных зависимостей коэффициентов преломления для образцов воды из разных источников Харьковского региона: 1 – «Рай-Еленовская» вода (\*); 2 – «Роганская» вода (o); 3 – дистиллят (∇); 4 – «Шестаковская» вода (⊗); 5 – шатиловский источник (◆); 6 – водопроводная вода (●)

$T, \text{ }^\circ\text{C}$  Благодаря усреднению измерений  $n$ , проведенных при нескольких температурах, отмечается различие прямых регрессии, которые получены при измерениях отдельных образцов питьевой воды.

Измеренные коэффициенты прямолинейной регрессии изучаемых образцов воды меняются в интервале от  $R \leq 0,06$  для «Рай-Еленовской» и дистиллированной воды, до  $R \geq 0,06$  – для водопроводной. Коэффициенты линейной регрессии для «Шатиловской» (0,056), «Роганской» (0,061) и «Шестаковской» (0,062) воды имеют значение, близкое к 0,06. В проводимых исследованиях обнаружено заметное изменение  $R$  для водопроводной воды со временем ее хранения. Если для свеженабранной воды из водопроводного крана  $R$  заметно превышает значение 0,06, достигая 0,08, то со временем оно приближается к значению  $R = 0,06$ . В отличие от водопроводной воды, дистиллированная вода сохраняет свои диэлектрические свойства в течение нескольких суток без заметных изменений. В таблице представлены значения коэффициента линейной регрессии  $R$  изучаемых образцов воды в порядке возрастания. Здесь же приведено значение коэффициента корреляции  $B$  проведенных измерений  $n$  с полученной прямой регрессии. Высокое значение коэффициента корреляции  $B$  (достигающее 0,9) является дополнительным аргументом, подтверждающим достоверность результатов проводимых исследований.

Источник воды	$R$	$B$
«Рай-Еленовская»	0,04–0,045	0,6–0,9
Дистиллированная	$\leq 0,06$	0,6–0,9
«Шатиловская»	0,055–0,06	0,8–0,9
«Шестаковская»	0,06–0,062	0,7–0,9
«Роганская»	0,06–0,065	0,8–0,9
Водопроводная	0,06–0,08	0,8–0,9

**Выводы.** Метод, предложенный для непосредственного измерения коэффициента преломления слабых водных растворов, позволяет производить измерение интегральной характеристики – коэффициента преломления  $n$  с достаточной точностью ( $\Delta n/n \leq 5\%$ ). Проведенными исследованиями показано, что предложенная экспресс-методика позволяет идентифицировать питьевую воду по коэффициенту преломления  $n$  с дополнительными измерениями его температурной зависимости.

1. *Мериакри В. В.* Контроль влагосодержания в средах и материалах с помощью миллиметровых волн / В. В. Мериакри,

- И. П. Никитин, Е. Е. Чигряй // Радиотехника. – 1996. – № 2. – С. 98–101.
2. *Фурашов Н. И.* Исследование диэлектрических свойств воды в диапазоне частот 75 – 120 ГГц / Н. И. Фурашов, В. Е. Дудин, Б. А. Свердлов // Изв. вузов. Радиофизика. – 2006. – 49, № 6. – С. 489–501.
3. *Кириченко А. Я.* Полудисковый диэлектрический резонатор с колебаниями шепчущей галереи для измерения электрических свойств воды / А. Я. Кириченко, А. Е. Когут // Изв. вузов. Радиофизика. – 2008. – 51, № 9. – С. 769–776.
4. *Голубничая Г. В.* Метод непосредственного измерения коэффициента преломления жидкостей в миллиметровом диапазоне / Г. В. Голубничая, А. Я. Кириченко // 18-я Междунар. Крымская конф. «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии»: материалы конф. – Севастополь, 2008. – С. 743–744.

A. Ya. Kirichenko, G. V. Golubnichaya

#### IDENTIFICATION OF POTABLE WATER FROM KHARKOV REGION SPRINGS, USING TEMPERATURE DEPENDENCE OF THEIR REFRACTION INDEXES

Refraction indexes of water samples from different springs and their dependencies upon temperature are studied in millimeter wavelength using oscillating string method. It is established that temperature dependence of refraction index in the investigated range of temperatures can be approximated by linear dependence. It is shown that coefficient of the linear regression of temperature dependence allows one to distinguish waters from different springs.

**Key words:** method of vibrations string, permittivity, water.

О. Я. Кириченко, Г. В. Голубничая

#### ІДЕНТИФІКАЦІЯ ПИТНОЇ ВОДИ ПРИРОДНИХ ДЖЕРЕЛ ХАРКІВСЬКОГО РЕГІОНУ З ВИКОРИСТАННЯМ ТЕМПЕРАТУРНОЇ ЗАЛЕЖНОСТІ ЇХ КОЕФІЦІЄНТІВ ЗАЛОМЛЕННЯ

З використанням методу коливної струни в мм діапазоні довжин хвиль було досліджено коефіцієнти заломлення та їх температурні залежності серії зразків питних вод з різних джерел. Встановлено, що температурну залежність коефіцієнтів заломлення в дослідженому діапазоні температур можна з достатньою точністю апроксимувати прямою. Показано, що за допомогою визначення коефіцієнта прямолінійної регресії коефіцієнта заломлення температурної залежності можна встановити належність зразка питної води до того чи другого джерела.

**Ключові слова:** метод коливної струни, діелектрична проникність, вода.

*Рукопись поступила 23.11.10 г.*