

DOI: 10.17725/rensit.2021.13.435

## Пассивные измерения показателя преломления жидкого азота и сыпучих веществ методом призмы в миллиметровом диапазоне волн

Голунов В.А., Гордеев К.В., Рыков К.Н.

Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Фрязинский филиал, <http://fire.relarn.ru/>  
Фрязино 141190, Московская область, Российская Федерация

E-mail: [golsnow@mail.ru](mailto:golsnow@mail.ru), [gordeev@yandex.ru](mailto:gordeev@yandex.ru), [constrykov@yandex.ru](mailto:constrykov@yandex.ru)

Поступила 17.08.2021, рецензирована 27.08.2021, принята 06.09.2021

Представлена действительным членом РАЕН В.В. Колесовым

**Аннотация:** Предложено использовать в диапазоне миллиметровых волн классический метод призмы для измерения показателя преломления жидких и сыпучих веществ, включая смеси с размерами частиц, соизмеримыми с длиной волны. Метод реализован с помощью полой радиопрозрачной прямоугольной призмы, заполняемой исследуемым веществом. Измерения выполнены в режиме теплового излучения с помощью радиометров с рупорно-линзовыми антеннами на частотах 37.5 и 94 ГГц. Для измерения отклонения преломленного луча использовался линейный сканер с установленным на нем черным телом, охлажденным жидким азотом. Расстояние между призмой и сканером составляло 1 м. Выполнены измерения показателя преломления жидкого азота, песка, гравия, мраморной крошки и гранулированного полиэтилена. Используя рефракционную формулу и формулу Ландау-Лифшица-Луенга для расчета зависимости показателя преломления бинарных смесей от объемной плотности частиц, получены оценки показателя преломления материала частиц в исследованных веществах, удовлетворительно согласующиеся с известными экспериментальными данными для кварца, полевого шпата, гранита и мрамора.

**Ключевые слова:** метод призмы, показатель преломления, миллиметровые волны, тепловое излучение, смеси частиц, соизмеримых с длиной волны

УДК 535.36, 621.396.11

**Благодарности:** Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (ГЗ № 0030-2019-0008).

**Для цитирования:** Голунов В.А., Гордеев К.В., Рыков К.Н. Пассивные измерения показателя преломления жидкого азота и сыпучих веществ методом призмы в миллиметровом диапазоне волн. *РЭНСИТ: Радиозлектроника. Наносистемы. Информационные технологии*, 2021, 13(4):435-442. DOI: 10.17725/rensit.2021.13.435.

## Passive Measurements of the Refractive Index of Liquid Nitrogen and Free-flowing Substances by the Prism Method in the Millimeter Wavelength Range

Valery A. Golunov, Konstantin V. Gordeev, Konstantin N. Rykov

Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics of RAS, Fryazino Branch, <http://fire.relarn.ru/>  
Fryazino 141190, Moscow region, Russian Federation

E-mail: [golsnow@mail.ru](mailto:golsnow@mail.ru), [gordeev@yandex.ru](mailto:gordeev@yandex.ru), [constrykov@yandex.ru](mailto:constrykov@yandex.ru)

Received August 17, 2021, peer-reviewed August 27, 2021, accepted September 06, 2021

**Abstract:** It is proposed to use the classical prism method in the millimeter wavelength range for measuring the refractive index of liquid and free-flowing substances, including mixtures with particle sizes comparable to the wavelength. The method is implemented using a hollow radio transparent rectangular prism filled with a test substance. The measurements were carried out

in the thermal radiation mode using radiometers with horn-lens antennas at frequencies of 37.5 and 94 GHz. To measure the deflection of the refracted beam, a linear scanner with a black body mounted on it, cooled with liquid nitrogen, was used. The distance between the prism and the scanner was 1 m. The refractive index of liquid nitrogen, sand, gravel, marble chips and granular polyethylene were measured. Using the refractive formula and the Landau-Lifshitz-Loeong formula for calculating the dependence of the refractive index of binary mixtures on the bulk density of particles, estimates of the refractive index of the material of the particles that make up the substances under study are obtained. They are in satisfactory agreement with the known experimental data for quartz, feldspar, granite, and marble.

*Keywords:* prism method, refractive index, millimeter waves, thermal radiation, mixtures of particles commensurate with the wavelength

UDC 535.36, 621.396.11

*Acknowledgements:* Work was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (State Order No. 0030-2019-0008).

*For citation:* Valery A. Golunov, Konstantin V. Gordeev, Konstantin N. Rykov. Passive Measurements of the Refractive Index of Liquid Nitrogen and Free-flowing substances by the Prism Method in the Millimeter Wavelength Range. *RENSIT: Radioelectronics. Nanosystems. Information technologies*, 2021, 13(4):435-442. DOI: 10.17725/rensit.2021.13.435.

## СОДЕРЖАНИЕ

1. ВВЕДЕНИЕ (436)
  2. СХЕМА, МЕТОДИКА И АППАРАТУРА ИЗМЕРЕНИЙ (437)
  3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ (438)
  4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ (440)
  5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ (440)
- ЛИТЕРАТУРА (441)

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Показатель преломления является одной из важнейших характеристик твердых, жидких и газообразных сред, определяющих их электродинамические свойства [1]. Для измерения показателя преломления разработано множество методов, учитывающих как особенности исследуемых сред, так и технические возможности используемого диапазона волн. Например, в диапазоне миллиметровых (ММ) волн используются методы, реализуемые с помощью активных волноводных, резонаторных, квазиоптических и открытых систем [2-7]. В оптическом диапазоне со времен Ньютона широко применяется метод призмы, основанный на ее свойстве за счет преломления разлагать белый свет на спектральные составляющие.

Определенное практическое значение имеет возможность оценки диэлектрической проницаемости (ДП) твердого вещества по измеренным значениям ДП смеси его частиц с воздухом, и наоборот. Широко

применяемые формулы расчета зависимости ДП бинарных смесей от объемной плотности частиц такие, как Максвелла, Гарнета, Поддерван Сантена, разработаны в рамках теории эффективной среды в приближении частиц, малых в сравнении с длиной волны [8,9]. Этому условию удовлетворяют, например, результаты измерений, выполненных на коаксиальных, волноводных и резонаторных устройствах, поскольку пренебрежимо малые размеры частиц являются необходимым условием для корректности измерений на этих устройствах. Однако, даже выполнение этого условия не гарантирует удовлетворительного согласования экспериментальных данных с результатами расчетов, выполненных по какой-либо из указанных выше формул. Причина в том, что при средних значениях объемной плотности эти формулы приводят к расходящимся значениям диэлектрической проницаемости [10].

При увеличении размера частиц возникает многократное рассеяние между отдельными частицами, что оказывает влияние на диэлектрические свойства среды. Однако, строгий учет эффекта рассеяния, осуществляемый в рамках теории сильных флуктуаций [11,12], квазикристаллического приближения (QCA) и квазикристаллического приближения с когерентным потенциалом (QCA-CP) [13], незначительно увеличивает

допустимое отношение размера частиц к длине волны.

При распространении ММ волн в таких сыпучих средах как песок, снег, гравий, размеры частиц могут быть соизмеримы с длиной волны, что, с одной стороны, может приводить к возникновению эффекта многократного рассеяния, с другой стороны, ограничивает применение волноводных и резонаторных устройств для измерения их ДП.

В данной работе для измерения показателя преломления жидких и сыпучих слабо поглощающих сред, включая смеси с частицами, размеры которых соизмеримы с длиной волны, предложен вариант реализации метода призмы на ММ волнах в пассивном режиме. В качестве исследуемых сред использованы жидкий азот, песок, гранулированный полиэтилен, мраморная крошка и гравий. Измерения показателя преломления выполнены на частотах 37.5 и 94 ГГц.

## 2. СХЕМА, МЕТОДИКА И АППАРАТУРА ИЗМЕРЕНИЙ

Использование преломляющих свойств призмы для измерения показателя преломления веществ предполагает, чтобы эти вещества имели призматическую форму. Если при исследовании твердых веществ такая форма изготавливается за счет их соответствующей обработки, то при исследовании жидкостей и сыпучих веществ необходима предварительная заготовка призматической емкости. В предложенном исследовании для придания таким образцам необходимой призматической формы были созданы трехгранные полые призмы с входными и выходными для излучения гранями, изготовленными из листового пенопласта марки «Пеноплекс» толщиной 20 мм, который обеспечивал как необходимую жесткость призмы, так и практически абсолютную прозрачность для ММ волн. Основание призмы изготовлено из дерева в форме прямоугольного треугольника. Чертеж призматической кюветы показан на Рис. 1.

На Рис. 2 показан ход лучей в прямоугольной призме, наполненной веществом с показателем преломления  $n$ , при нормальном падении плоской волны сверху. Угол падения на нижнюю грань  $\alpha$  и угол преломления  $\alpha + \beta$  связаны

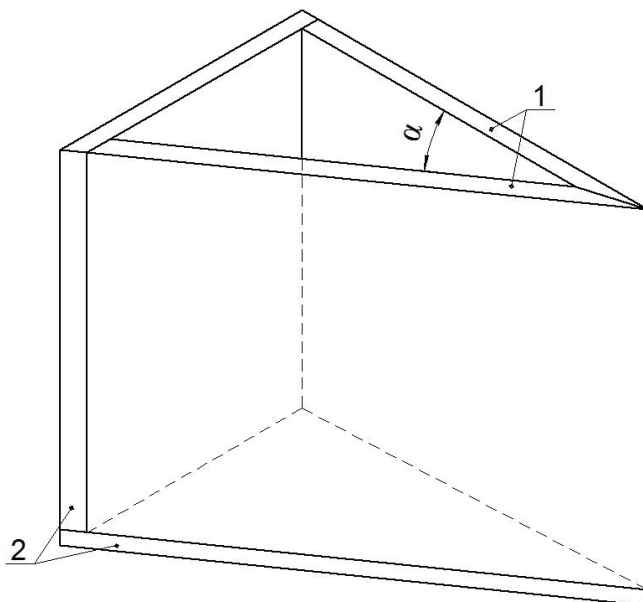


Рис. 1. Конструкция прямоугольной призмы: 1 – пенопласт, 2 – дерево.

соотношением Снеллиуса

$$n \sin \alpha = \sin(\alpha + \beta) \quad (1)$$

На расстоянии  $OB = L$  от преломляющей грани луч смещается в поперечном направлении на расстояние  $AB = x$ . Если  $L$  и  $x$  известны, то показатель преломления в соответствии с (1) определяется следующим образом:

$$n = \frac{\sin(\beta + \alpha)}{\sin \alpha} = \frac{\sin[\arctg(x/L) + \alpha]}{\sin \alpha}. \quad (2)$$

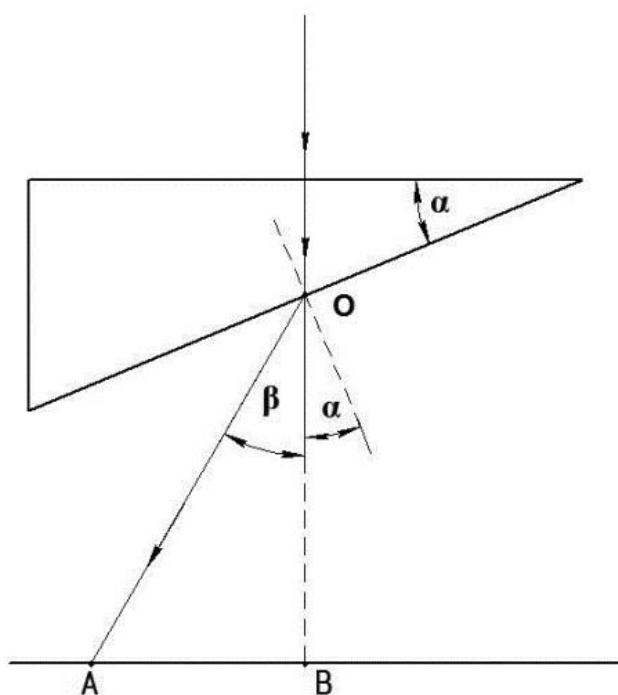
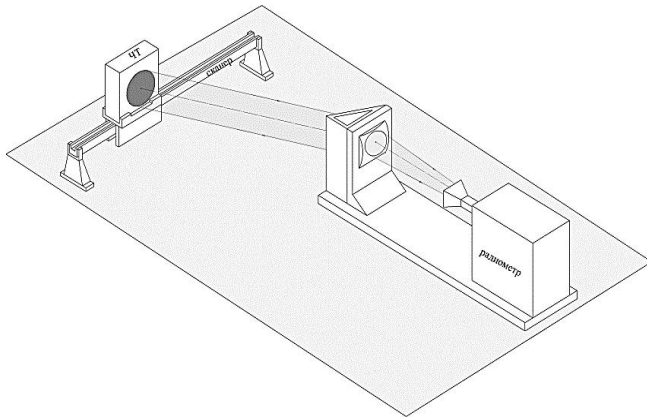


Рис. 2. Ход лучей в призме.



**Рис. 3.** Схема измерения показателя преломления.

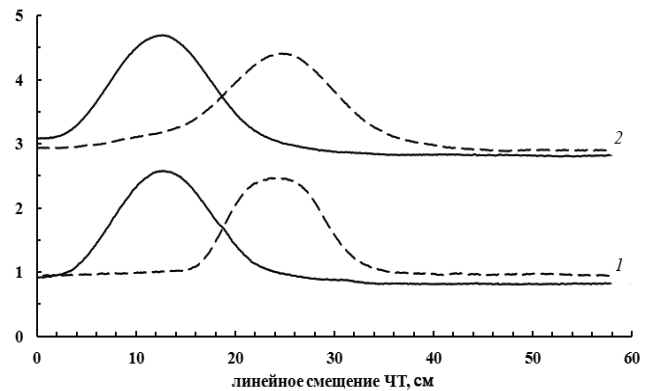
Соотношение (2) является, по сути, классическим алгоритмом измерения показателя преломления веществ. Новизной предлагаемой ниже методики измерений является реализация алгоритма в режиме теплового излучения.

Схема измерений показана на **Рис. 3**. Приемная система состояла из радиометра с рупором и линзовой антенны с апертурой  $180 \times 160$  мм при фокусном расстоянии линзы 400 мм. В качестве источника излучения использовалось черное тело (ЧТ) размером  $100 \times 200$  мм, охлажденное жидким азотом. ЧТ было установлено на подвижную платформу линейного сканера с длиной хода 1 м. Сканирование осуществлялось перпендикулярно к оптической оси антенны на расстоянии до 1.5 м от призмы, установленной почти вплотную к линзе. Размеры грани призмы, примыкающей к линзе, составляли  $250 \times 200$  мм. Для исследования веществ в зависимости от их диэлектрических и ослабляющих свойств использовались три призматические кюветы, отличающиеся только значениями угла  $\alpha$  (100, 250 и 400), показанного на рис. 1.

Тепловое излучение ЧТ принималось широкополосными радиометрами с центральными частотами 37.5 и 94 ГГц при чувствительностях не хуже 0.2 К при постоянной времени 1 с. Выходные сигналы радиометров регистрировались через АЦП на компьютере.

### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Призматическая кювета, как отмечено выше, предназначена для измерения показателя преломления жидкостей и сыпучих веществ. Рассмотрим сначала результаты измерения показателя преломления жидкого



**Рис. 4.** Выходные сигналы радиометров на частотах 37.5 ГГц (1) и 94 ГГц (2) при движении ЧТ вдоль перпендикуляра к оптической оси линзовой антенны при пустой кювете (сплошные линии) и заполненной жидким азотом (пунктирные линии).

азота, диэлектрические свойства которого представляют особый интерес в связи с его широким применением в радиометрии для охлаждения черных тел (ЧТ), используемых при калибровке радиометров. На **Рис. 4** показаны записи выходных сигналов радиометров на частотах 37.5 и 94 ГГц при движении ЧТ вдоль перпендикуляра к оптической оси линзовой антенны (см. Рис. 3). На каждой частоте выполнялись две записи выходного сигнала, одна из которых (калибровочная) соответствовала случаю полой призмы, другая — заполненной жидким азотом. Угол кюветы  $\alpha = 250$ , расстояние  $L$  на частотах 37.5 и 94 ГГц составляло соответственно 1.28 м и 1.31 м (см. Рис. 2).

Смещения  $x$  преломленных лучей относительно прямых лучей, определенные как разности максимальных значений соответствующих выходных сигналов радиометров, составили 11.55 см на частоте 37.5 ГГц и 11.84 см — 94 ГГц. В результате вычислений по формуле (2) на обеих частотах получены практически совпадающие значения показателей преломления жидкого азота, равные  $n = 1.189$ , чему соответствует значение действительной части  $\text{ДП } \epsilon' = 1.41$ . То, что на обеих частотах получены равные значения  $n$ , следовало ожидать, поскольку азот, как известно, является нейтральным газом. Для сравнения в Интернете для жидкого азота приводятся значения  $\epsilon' = 1.4 \dots 1.5$ , но отсутствует информация об использованных методах

Таблица  
Экспериментальные значения показателя  
преломления сыпучих веществ

	вещество	размеры частиц, мм	n	$\rho_v$	$\rho$ , г/см <sup>3</sup>	$\rho_0$ , г/см <sup>3</sup>	$\alpha$ , угл. град.
1	песок	<0.5	1.67	0.67	1.67	2.49	10
2	песок	<1	1.62	0.62	1.59	2.4	10
3	гравий	<1	1.64	0.59	1.55	2.63	10
4	гравий	1-2	1.62	0.56	1.55	2.8	10
5	гравий	3-4	1.665	0.57	1.65	2.9	10
6	мрамор	1-2	1.748	0.48	1.28	2.65	10
7	полиэтилен	3	1.34	0.6	0.575	0.96	30
8	полиэтилен	4	1.32	0.64	0.615	0.96	30
9	полиэтилен	5	1.23	0.4	-	-	40
10	полиэтилен	5	1.32	0.625	0.6	0.96	30

измерения этой величины.

Из сыпучих веществ на частоте 37.5 ГГц измерены значения показателя преломления песка, гравия, мраморной крошки и гранулированного полиэтилена, которые представлены в **Таблице**. Кроме того, в таблице для каждого вещества приведены значения объемной плотности частиц  $\rho_v$ , плотности смеси  $\rho$ , плотности  $\rho_0$  твердого материала частиц и угла призмы  $\alpha$ , при котором выполнены измерения  $n$ .

Плотность твердого материала частиц  $\rho_0$  и их объемная плотность в смеси  $\rho_v$  связаны соотношением:

$$\rho_0 = \frac{\rho}{\rho_v}, \quad (3)$$

где  $\rho$  – плотность смеси, определяемая как отношение массы  $M$  смеси к ее объему  $V_0$ :

$$\rho = \frac{M}{V_0}. \quad (4)$$

Таким образом, если известна плотность материала частиц, то объемная плотность определяется по результатам измерений  $M$  и  $V_0$  с использованием соотношений (3, 4). Такой подход был использован при расчете объемной плотности мраморной крошки и полиэтилена, поскольку была известна их плотность.

Объемная плотность песка и гравия, в состав которых могли входить различные минералы с неизвестной концентрацией, определялась путем определения объема пустот при заполнении их водой:

$$\rho_v = \frac{V_0 - V_w}{V_0}, \quad (5)$$

где  $V_0$  – полный объем смеси,  $V_w$  – объем пустот.

В теории случайных плотных сред и приложениях, требующих широкого выбора плотности, был введен большой набор правил смешивания [10], например, путем написания приближения «степенного закона», которое в случае смеси частиц с воздухом записывается в виде:

$$\varepsilon_{eff}^\eta = 1 + \rho_v (\varepsilon_m^\eta - 1), \quad (6)$$

где  $\varepsilon_{eff}$  – эффективная ДП смеси,  $\varepsilon_m$  – ДП материала частиц,  $\eta$  – показатель степени. Валидация формул смесей осуществляется путем сравнения с радиофизическим экспериментом. Из большого количества опубликованных работ выделим исследования [14,16], в которых показано, что экспериментальные зависимости  $\varepsilon_{eff}(\rho_v)$  как в случае жидких, так и порошковых бинарных смесей наилучшим образом аппроксимируются при использовании рефракционной формулы [17] и формулы Ландау-Лифшица-Луенга [18,19].

Рефракционная формула записывается в виде (6) при  $\eta = 1/2$ :

$$\sqrt{\varepsilon'_{eff}} = 1 + \rho_v (\sqrt{\varepsilon'_m} - 1). \quad (7)$$

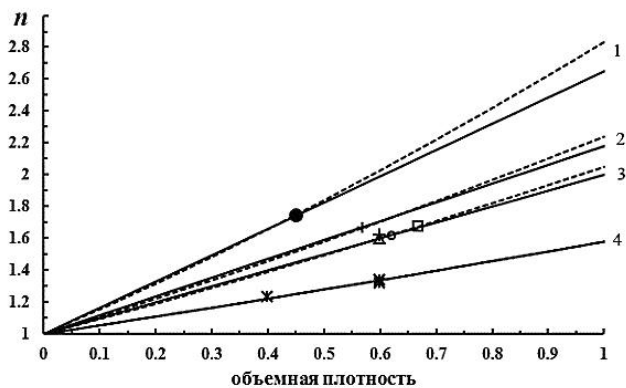
Для слабо поглощающих частиц  $\varepsilon'_m \gg \varepsilon''_m$ , поэтому  $\sqrt{\varepsilon'_{eff}} = n_{eff}$ ,  $\sqrt{\varepsilon'_m} = n_m$  и (7) преобразуется к виду:

$$n_{eff} = 1 + (n_m - 1)\rho_v. \quad (8)$$

Таким образом, рефракционная модель соответствует линейной зависимости показателя преломления смеси от объемной плотности частиц, при этом коэффициент пропорциональности, равный  $(n_m - 1)$ , определяется показателем преломления материала частиц. Следовательно, измеряя показатель преломления смеси при известной объемной плотности частиц, можно определить показатель преломления материала частиц.

Формула Ландау-Лифшица-Луенга применима для смеси разнородных частиц с произвольной формой и записывается в виде (6) при  $\eta = 1/3$ :

$$\varepsilon_{eff}^{1/3} = 1 + \rho_v (\varepsilon_m^{1/3} - 1)$$



**Рис. 5.** Графики зависимости показателя преломления от объемной плотности частиц: 1 – мрамор, 2 – гравий ( $d = 2 \dots 4$  мм), 3 – гравий ( $d < 2$  мм) и песок, 4 – полиэтилен ( $d = 3 \dots 5$  мм). Сплошные линии – расчетные по рефракционной формуле, пунктирные – по формуле Ландау-Лифшица-Луйенга. Дискретные символы – экспериментальные значения.

или

$$n_{\text{eff}} = \left[ 1 + \rho_V (n_m^{2/3} - 1) \right]^{3/2}. \quad (9)$$

Из (9) следует, что показатель преломления зависит от объемной плотности нелинейно.

На **Рис. 5** представлены полученные в данной работе экспериментальные данные и графики зависимости показателя преломления от объемной плотности частиц, рассчитанные по формулам (8) и (9). Видно, что нелинейность зависимости показателя преломления от объемной плотности, соответствующая формуле (9), проявляется тем сильнее, чем выше показатель преломления материала частиц. В случае полиэтиленовых гранул обе формулы приводят практически к совпадающим графикам при значении показателя преломления полиэтилена  $n_m = 1.58$  ( $\epsilon_m = 2.49$ ). Это значение оказалось незначительно завышенным в сравнении со справочными данными  $\epsilon_m = 2.3 \dots 2.4$ .

#### 4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Интересным фактом оказалось совпадение экспериментальных данных для песка и мелкого гравия. Это означает, что песок и мелкий гравий имели близкие по составу минеральные составляющие. Показатель преломления материала их частиц, рассчитанный по рефракционной формуле, оказался равным  $n_m = 2$  ( $\epsilon_m = 4$ ), а рассчитанный по формуле Ландау-Лифшица-Луйенга –  $n_m = 2.05$  ( $\epsilon_m = 4.2$ ).

Зёрна гравия могут содержать кварцы, полевые шпаты, и другие минералы. Из различных источников (например, [20,22]) следует, что показатель преломления кварца оценивается в пределах  $1.9 \dots 2.1$ , полевого шпата – свыше  $2.25$ . Таким образом, результаты измерения показателя преломления песка и мелкого гравия удовлетворительно согласуются с известными данными в предположении, что в их составе основным минералом является кварц.

Показатель преломления гравия с размерами частиц  $d = 2 \dots 4$  мм оказался заметно выше, чем для песка и более мелкого гравия ( $d = 1 \dots 2$  мм). Причиной этому может служить повышенная концентрация в материале более крупных частиц таких минералов, как полевой шпат и граниты, показатель преломления которых выше, чем у кварца [20,22].

Наиболее высокие значения показателя преломления оказались у крошки из белого мрамора. Показатель преломления мрамора, рассчитанный по рефракционной формуле, оказался равным  $n_q = 2.57$  ( $\epsilon_q = 6.6$ ), а рассчитанный по формуле Ландау-Лифшица-Луйенга –  $n_q = 2.7$  ( $\epsilon_q = 7.29$ ). Известно [23] что диэлектрические свойства мрамора, даже белого, который рассматривается как один из самых чистых кальцитов, сильно зависят от его химического состава. В [24] для мрамора с неизвестным составом приведены значения  $\epsilon_m = 7.2 \dots 6.8$ , измеренные на частотах  $40\text{-}50$  ГГц. С этими значениями удовлетворительно согласуются данные, полученные в настоящей работе и приведенные выше.

Таким образом, сравнительный анализ экспериментальных данных, полученных для ряда сыпучих веществ, показал, что применение призматической кюветы обеспечивает возможность измерения их показателя преломления методом призмы в режиме приема теплового излучения.

#### 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе исследованы особенности применения классического метода призмы в диапазоне ММ волн для измерения показателя преломления сыпучих веществ с размерами частиц, соизмеримыми с длиной волны. Показано, что метод реализуется с помощью

полой радиопрозрачной призматической кюветы, заполняемой исследуемым веществом. Кроме того, предложенный метод может быть реализован в пассивном режиме. Значения показателя преломления смесей песка, гравия, мраморной крошки и полиэтилена с воздухом, измеренные методом призмы на частоте 37.5 ГГц, удовлетворительно согласуются с известными экспериментальными данными для кварца, полевого шпата, полиэтилена и мрамора.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Рытов СМ, Кравцов ЮА, Татарский ВИ. *Введение в статистическую радиофизику. Ч. 1-2.* М., Наука, 1978.
2. Валитов РА, Дюбко СФ, Камышан ВВ, Кузьмичев ВМ, Макаренко БИ, Соколов АВ, Шейко ВП. *Техника субмиллиметровых волн.* М., Советское Радио, 1969, 477 с.
3. Пархоменко МП, Калёнов ДС, Федосеев НА, Еремин ИС, Колесникова ВМ, Ковтыков ДА. Улучшенный резонаторный метод для измерения комплексной диэлектрической проницаемости материалов. *Радиотехника и электроника*, 2017, 62(7):651-656.
4. Пархоменко МП, Калёнов ДС, Еремин ИС, Федосеев НА, Колесникова ВМ, Дьяконова ОА. Повышение точности измерений комплексных диэлектрической и магнитной проницаемостей в сверхвысокочастотном диапазоне волноводным методом. *Радиотехника и электроника*, 2020, 65(8):764-768.
5. Parkhomenko MP, Kalenov DS, Eremin IS, Fedoseev NA, Kolesnikova VM, Barinov YuL. Usage and experimental tests of the modified waveguide method for measurement of the complex permittivity and permeability of materials. *Physics of Wave Phenomena*, 2019, 27(4):299-306.
6. Sato K; Manabe T; Polivka J; Ihara T, Kasashima Y; Yamaki K.. Measurement of the complex refractive index of concrete at 57.5 GHz. *IEEE Trans. Antennas and Propagation*, 1996, 44(1):35-40.
7. Derov JS, Turchinets BW, Crisman EE, Drehman AJ, Best SR; Wing RM. Free space measurements of negative refraction with varying angles of incidence. *IEEE Microwave and wireless components letters*, 2005, 15(9):567-569.
8. Sihvola AH, Kong JA. Effective permittivity of dielectric mixtures. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 1988, 26(4):420-429.
9. Tuncer E; Serdyuk YV, Gubanski SM. Dielectric mixtures: electrical properties and modeling. *IEEE Trans. Dielectrics and Electrical Insulation*, 2002, 9(5):809-828.
10. Sihvola AH. Mixing rules with complex dielectric coefficient. *Subsurface Sensing Technologies and Applications*, 2000, 1(4):393-415.
11. Рыжов ЮА, Тамойкин ВВ, Татарский ВИ. О пространственной дисперсии неоднородных сред. *ЖЭТФ*, 1965, 48(2):656-665.
12. Zhuck, NP, Schüemann K, Shulga SN. Effective permittivity of a statistically inhomogeneous medium with strong permittivity fluctuations. *J. Electromagnetic Waves and Applications*, 2004, 18(3):357-359.
13. Tsang L, Kong JA, Shin R. *Theory of Microwave Remote Sensing.* New York, Wiley-Interscience, 1985, 632 p.
14. Dube DC. Study of Landau-Lifshitz-Looyenga's formula for dielectric correlation between powder and bulk. *J. Applied Phys.*, 1970, 3(11):1648-1652.
15. Zhou P-H, Deng L-J, Wu B-I, Kong JA. Influence of scatter's geometry on power-law formula in random mixing composites. *Progress In Electromagnetics Research*, 2008, PIER 85:69-82.
16. Sheen J, Hong Z-W. Microwave measurements of dielectric constants by exponential and logarithmic mixture equations. *Progress In Electromagnetics Research*, 2010, PIER 100:13-26.
17. Kraszewski A, Kulinski S, Matuszewski M. Dielectric properties and a model of biphasic water suspension at 9.4 GHz. *J. Applied Phys.*, 1976, 47:1275-1277.
18. Ландау АД, Лифшиц ЕМ. *Электродинамика сплошных сред.* М., Физматгиз, 1959, 532 с.
19. Looyenga H. Dielectric constants of heterogeneous mixtures. *Physica*, 1965, 31(3):401-412.
20. Zheng Y, Wang S, Feng J, Ouyang Z, Li X. Measurement of the complex permittivity of dry rocks and minerals: application of polythene dilution method and Lichtenecker's mixture formulae. *Geophys. J. Intern.*, 2005, 163(3):1195-1202.
21. Arcone SA, Boitnott GE. Complex permittivity of common minerals and one soil at low water

- contents. *Proceed. of the XIII Intern. Conf. Ground Penetrating Radar* (Lecce, Italy, 2010). IEEE, 2010.
22. Manouchehri HR, Rao KH, Forssberg KSE. Triboelectric charge, electrophysical properties and electrical beneficiation potential of chemically treated feldspar, quartz and wollastonite. *Physical Separation in Science and Engineering*, 2002, 11(Article ID 046414):9-32.
23. Sengwa RJ, Sony A. Dielectric dispersion and microwave dielectric study of marbles in support of radar investigations. *Indian J. of Pure@Applied Physics*, 2005, 43:777-782.
24. Shao Yu, Liao Xi, Wang Yang. Complex permittivity of typical construction materials over 40-50 GHz. *Proc. 2018 IEEE Intern. Symp. on Antennas and Propagation & USNC/URSI National Radio Science Meeting*. (Boston, MA, USA, 2018). N.Y., 2018.

**Голунов Валерий Алексеевич**

*к.ф.-м.н, с.н.с*

ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, Фрязинский филиал  
**1, пл. Введенского, Фрязино 141190, Моск. обл., Россия**  
**golsnow@mail.ru**

**Гордеев Константин Владимирович**

*вед. инженер*

ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, Фрязинский филиал  
**1, пл. Введенского, Фрязино 141190, Моск. обл., Россия**  
**gordeev@yandex.ru**

**Рыков Константин Николаевич**

*вед. электроник*

ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, Фрязинский филиал  
**1, пл. Введенского, Фрязино 141190, Моск. обл., Россия**  
**constrykov@yandex.ru.**