

DOI: 10.17516/1998-2836-0239

УДК 544.08

## Resonator Method for Studying Dielectric Characteristics of Caustobiolithes

Vladimir V. Parshin<sup>a</sup>, Evgeniy A. Serov<sup>a</sup>,  
Dmitriy I. Sobolev<sup>a, b</sup>, Tatiana O. Krapivnitskaia<sup>a</sup>,  
Alexey V. Vakhin<sup>c</sup>, Svetlana A. Bulanova<sup>\*a, b</sup>,  
Nikolay Yu. Peskov<sup>a, b</sup> and Mikhail Yu. Glyavin<sup>a</sup>

<sup>a</sup>*Federal Research Center Institute of Applied Physics RAS  
Nizhny Novgorod, Russian Federation*

<sup>b</sup>*Lobachevsky State University  
Nizhny Novgorod, Russian Federation*

<sup>c</sup>*Kazan Federal University  
Kazan, Russian Federation*

Received 05.04.2021, received in revised form 28.06.2021, accepted 16.08.2021

**Abstract.** For the sub-THz range, a method for studying the electrodynamic characteristics of organic materials – caustobiolithes—is developed on the basis of a resonator spectrometer. In the frequency range 110 ÷ 260 GHz, the dielectric parameters (refractive index  $n$  and  $\tan\delta$ ) of peat powders after its microwave processing in the process of «soft» pyrolysis, as well as core sections of oil-containing rock, were studied. The influence of natural humidity on the dielectric parameters of the samples is considered. The reasons for the spread of measurement results, which is observed in these materials and is their specific feature, are discussed.

**Keywords:** combustible minerals, microwave pyrolysis, measurement of dielectric characteristics, resonator spectrometer.

*Citation:* Parshin, V.V., Serov, E.A., Sobolev, D.I., Krapivnitskaia, T.O., Vakhin, A.V., Bulanova, S.A., Peskov, N.Yu., Glyavin, M.Yu. Resonator method for studying dielectric characteristics of caustobiolithes, J. Sib. Fed. Univ. Chem., 2021, 14(3), 315–324. DOI: 10.17516/1998-2836-0239

## Резонаторный метод исследования диэлектрических характеристик каустобиолитов

В. В. Паршин<sup>а</sup>, Е. А. Серов<sup>а</sup>,  
Д. И. Соболев<sup>а, б</sup>, Т. О. Крапивницкая<sup>а</sup>, А. В. Вахин<sup>в</sup>,  
С. А. Буланова<sup>а, б</sup>, Н. Ю. Песков<sup>а, б</sup>, М. Ю. Глявин<sup>а</sup>

<sup>а</sup>Институт прикладной физики РАН

Российская Федерация, Нижний Новгород

<sup>б</sup>Нижегородский государственный университет

им. Н. И. Лобачевского

Российская Федерация, Нижний Новгород

<sup>в</sup>Казанский (Приволжский) федеральный университет

Российская Федерация, Казань

**Аннотация.** Для суб-ТГц диапазона на основе резонаторного спектрометра развита методика исследования электродинамических характеристик органических материалов – каустобиолитов. В диапазоне частот 110 ÷ 260 ГГц проведены исследования диэлектрических параметров (показателя преломления  $n$  и  $\tan\delta$ ) порошков торфа после его СВЧ-переработки в процессе «мягкого» пиролиза, а также срезов керна нефтесодержащей породы. Рассмотрено влияние естественной влажности на диэлектрические параметры образцов. Обсуждаются причины разброса результатов измерений, который наблюдается в указанных материалах и является их специфической особенностью.

**Ключевые слова:** горючие полезные ископаемые, СВЧ-пиролиз, измерение диэлектрических характеристик, спектрометр на основе открытого резонатора.

Цитирование: Паршин, В. В. Резонаторный метод исследования диэлектрических характеристик каустобиолитов / В. В. Паршин, Е. А. Серов, Д. И. Соболев, Т. О. Крапивницкая, А. В. Вахин, С. А. Буланова, Н. Ю. Песков, М. Ю. Глявин // Журн. Сиб. федер. ун-та. Химия, 2021, 14(3). С. 315–324. DOI: 10.17516/1998-2836-0239

### Введение

Физико-химическая переработка органического сырья в настоящее время одно из приоритетных направлений исследований, востребованных в различных областях современной науки, техники, экологии, экономики и промышленного производства. Одним из перспективных методов обработки материалов является использование мощного микроволнового излучения. До последнего времени типичные рабочие частоты подобных систем составляли несколько гигагерц в силу относительно низкой стоимости и высокого КПД источников излучения (промышленных магнетронов [1–6]). В настоящее время активно ведется разработка эффективных источников мощного излучения с частотой от десятков до сотен гигагерц, работающих как в импульсном, так и непрерывном режиме, – гиротронов [7–9]. На основе гироприборов в ИПФ РАН создана серия комплексов для микроволновой обработки материалов [10, 11], которые ши-

роко используются для решения фундаментальных и прикладных задач [12–15]. В перспективе представляет интерес освоение мощными источниками излучения более высокочастотных диапазонов с одновременным расширением сферы их приложений.

В обсуждаемом аспекте представляет интерес анализ диэлектрических свойств горючих полезных ископаемых (каустобиолитов), поскольку экспериментальные исследования поглощающих свойств этих материалов на частотах в десятки и сотни ГГц до настоящего времени не проводились. В данной работе отражены исследования электродинамических характеристик органических полимерных материалов (керогенов) на частотах до 260 ГГц.

### Резонаторные методы исследований

Измерения на основе открытых резонаторов широко используются для исследования диэлектрических характеристик материалов в микроволновом диапазоне. Вследствие большой добротности применяемых резонаторов ( $\sim 10^6$ ) и, соответственно, хорошо сформированного аксиально-симметричного поля внутри них и пренебрежимо малого влияния паразитных лучей (боковых лепестков) измерительные установки на основе резонаторов Фабри-Перо имеют в настоящее время максимальную точность и чувствительность.

Для таких измерений, как правило, требуется простейшая конфигурация исследуемого образца – плоскопараллельный слой с диаметром, достаточным для пренебрежения дифракционными потерями на его краях. Применяют два основных типа открытых резонаторов: симметричный [16], образованный двумя сферическими зеркалами, и полусимметричный [17], образованный сферическим и плоским зеркалами.

Симметричный резонатор обычно используется для исследования твердых диэлектриков. Достоинством метода измерений [18, 19], используемого в настоящей работе для исследования нефтесодержащих кернов, является отсутствие необходимости информации о толщине диэлектрика. Измерения производятся на резонансной частоте пластины, когда ее оптическая толщина кратна целому числу полувольт:

$$t \cdot n = m \cdot \frac{\lambda}{2} \quad (1)$$

где  $t$  – толщина пластины;  $n$  – показатель преломления диэлектрика;  $\lambda = \frac{c}{f}$  – длина волны в вакууме;  $f$  – ее частота;  $m$  – целое число. При этом толщина пластины не измеряется непосредственно, а рассчитывается вместе с показателем преломления. Это важно для достижения высокой точности определения диэлектрических параметров, так как именно погрешность измерения толщины может вносить существенную ошибку в расчеты. При наличии ряда широкодиапазонных генераторов в качестве источников излучения, например ламп обратной волны (ЛОВ), поиск резонансных частот не представляет сложностей. Однако данную методику сложно использовать для исследования материалов «порошкового типа» из-за технических и технологических проблем, связанных с позиционированием слоя порошка в середине симметричного резонатора.

Для исследований порошковых материалов может быть использован полусимметричный резонатор, в котором слой порошка насыпается на плоское зеркало с ограничивающим кольцом (рис. 1), излишки порошка удаляют линейкой. Однако поиск резонансной частоты для слоя подобного диэлектрика как в методике, описанной в [18, 19], практически невозможен, а для

расчетов диэлектрических параметров, как, например, в [17], необходимо значение толщины слоя порошка, измерение которой с требуемой точностью в данном случае затруднено. Для решения данной проблемы в ИПФ РАН был разработан метод, когда слой порошка располагается на плоском зеркале полусимметричного резонатора, а измерения проводят на ряде произвольно выбранных частот в интересующем нас диапазоне.

Для нахождения показателя преломления  $n$  на каждой частоте  $f$  решается трансцендентное уравнение вида (см. подробнее [17])

$$F(k, n, t, L) = n \cdot \sin \varphi_1 \cdot \cos \varphi_2 + \cos \varphi_1 \cdot \sin \varphi_2 = 0, \quad (2)$$

где  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$  для полусимметричного резонатора определены как

$$\begin{aligned} \varphi_1 &= k \cdot (L - t) + \arctan \left( \frac{t}{n^2 \sqrt{\left(L - t + \frac{t}{n^2}\right) \cdot \left(R - L + t - \frac{t}{n^2}\right)}} \right) - \\ &- \arctan \left( \sqrt{\frac{L - t + \frac{t}{n^2}}{R - L + t - \frac{t}{n^2}}} \right) \\ \varphi_2 &= n \cdot k \cdot t - \arctan \left( \frac{t}{n \sqrt{\left(L - t + \frac{t}{n^2}\right) \cdot \left(R - L + t - \frac{t}{n^2}\right)}} \right) \end{aligned} \quad (3)$$

где  $k = \frac{2\pi f}{c}$ ;  $c$  – скорость света;  $L$  – длина резонатора (расстояние между зеркалами);  $R$  – радиус сферического зеркала. Для расчета  $\tan \delta$  используется выражение [10]

$$\tan \delta = \frac{4\pi n \cdot (L - t + D \cdot t) \cdot (\Delta f - \beta \cdot \Delta f_0)}{c \cdot D \cdot \left(\frac{4\pi n \cdot f \cdot t}{c} - \sin 2\varphi_2\right)}, \quad (4)$$

в котором  $\Delta f_0$  и  $\Delta f$  соответствуют ширине резонансных кривых «свободного» и нагруженного (с измеряемым образцом) резонатора,

$$D = \frac{n^2}{n^2 \cdot \cos^2 \varphi_2 + \sin^2 \varphi_2}, \quad \beta = \frac{L_0 \sqrt{L_0(R - L_0)}}{\lambda \cdot \left(L - t + t \cdot D \cdot \frac{n^4 \cdot \lambda^2 + n^2 \cdot t^2}{n^4 \cdot \lambda^2 + t^2}\right)}, \quad (5)$$

где  $L_0$  – длина пустого резонатора, имеющего резонанс на той же частоте  $f$ .

На рисунке 2 приведен пример графического решения уравнения (2) для четырех произвольно выбранных частот в диапазоне 160–240 ГГц. Можно видеть, что для каждой отдельной частоты существует множество решений, и выбор правильного корня уравнения требует знания хотя бы приближенного значения показателя преломления  $n$  исследуемого материала. Это значение сложно выбрать при исследовании порошков (даже если они изготовлены из известного материала) из-за его сильной зависимости от плотности. Проблема решается за счет использования нескольких частот. Например, для представленного на рис. 2 случая получаем  $n = 1,19$ .

Расчет величины  $\tan \delta$  (связанного с комплексной частью диэлектрической проницаемости) не представляет сложности, если известны толщина  $t$  и показатель преломления  $n$  об-

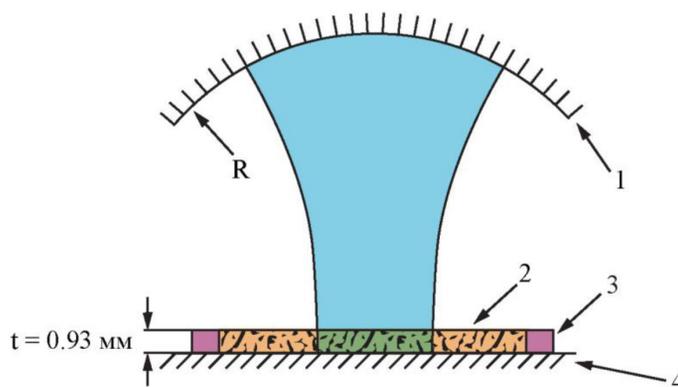


Рис. 1. Схема экспериментов по измерению диэлектрических свойств материалов на основе полусимметричного резонатора: 1 – сферическое зеркало; 2 – слой измеряемого диэлектрического порошка; 3 – ограничительное кольцо; 4 – плоское зеркало

Fig. 1. Scheme of measuring dielectric properties of materials based on a semi-symmetric resonator; 1 – spherical mirror; 2 – layer of the measured dielectric powder; 3 – limiting ring; 4 – flat mirror

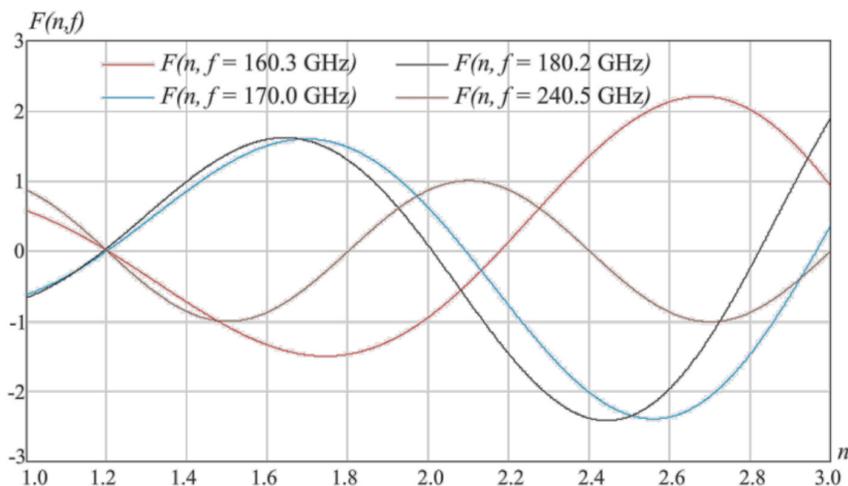


Рис. 2. Иллюстрация графического решения уравнения (2) для четырех произвольно выбранных частот  $f$ . Общее решение этого уравнения для всех частот  $n = 1,19$

Fig. 2. Illustration of the graphical solution of equation (2) for four randomly selected frequencies  $f$ . The general solution of this equation for all frequencies is  $n = 1,19$

разца. Измеряемыми величинами для расчета  $\tan \delta$  являются добротности пустого резонатора и резонатора с образцом. Длина резонатора, также входящая в расчеты, определяется отдельно из калибровочных измерений.

### Результаты исследования торфа

Для исследования диэлектрических параметров порошков последние помещались на плоское нижнее зеркало резонатора Фабри-Перо. После ряда экспериментов был выбран простой и наиболее воспроизводимый способ, а именно свободное насыпание порошка «с горкой» на поверхность зеркала с последующим удалением излишков, например, лезвием скальпеля.

За толщину образца принимается высота кольца, ограничивающего по периметру порошок. Небольшое отличие реальной толщины слоя порошка от высоты кольца связано с конечностью размеров зерна, составляющей до 1 мм. Это отличие было учтено в виде поправки, величина которой определялась исходя из минимального разброса показателя преломления, измеренного на разных частотах.

В проведенной серии экспериментов были исследованы два вида органического вещества. В качестве первого (исходного) образца, показанного на рис. 3а, был выбран необработанный порошок из верхового сфагнового торфа, второй порошок (рис. 3б) представлял собой твердую фракцию (углеродистый остаток), полученный после СВЧ-пиролиза. Оба порошка перед измерениями были просеяны через сито. Пиролиз исходного порошка осуществлялся при температуре  $\sim 250$  °С с нагревом СВЧ-излучением промышленного магнетрона с частотой 2,45 ГГц (так называемый мягкий пиролиз [20]).

Результаты измерений показателя преломления  $n$  и величины  $\tan \delta$  для указанных образцов представлены на рис. 4.

После каждого измерения порошок удаляли и проводили калибровочные измерения пустого резонатора. Проведенные эксперименты продемонстрировали хорошую повторяемость измерений и позволили определить показатель преломления для исходного торфа (образец 1)  $n_1 = 1,19 \pm 0,01$  и подвергнутого переработке в процессе СВЧ-пиролиза (образец 2)  $n_2 = 1,18 \pm 0,01$ . Столь близкое к единице значение связано с низкой плотностью вещества. Согласно проведенным измерениям, частотная зависимость  $n$  в исследуемом диапазоне практически отсутствует.

При измерениях  $\tan \delta$  наблюдалась статистическая повторяемость на уровне 5 %, частотная зависимость потерь близка к линейной. В то же время следует отметить важную отличительную особенность, присущую природным каустобиолитам (в частности, торфу) и связанную с их «случайным» и сложным многокомпонентным составом, который в результате приводит к неизбежному возникновению разброса параметров в различных выборках образцов. Таким образом, небольшие вариации в частотных зависимостях  $n$  и  $\tan \delta$  могут быть связаны с неоднородностью плотности порошка по площади слоя вместе с изменением диаметра пятна засветки резонатора в зависимости от частоты.

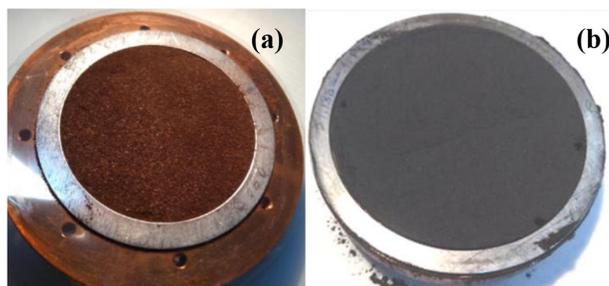


Рис. 3. Фотографии исследуемых образцов, помещенных в кольцо-кювету: а – исходный торфяной порошок; б – порошок после его СВЧ-переработки в процессе «мягкого» пиролиза. Диаметр кольца 70 мм

Fig. 3. Pictures of the samples placed in the ring-cell: a – the initial peat powder and b – the powder after its microwave processing in the process of «soft» pyrolysis. The ring diameter is 70 mm

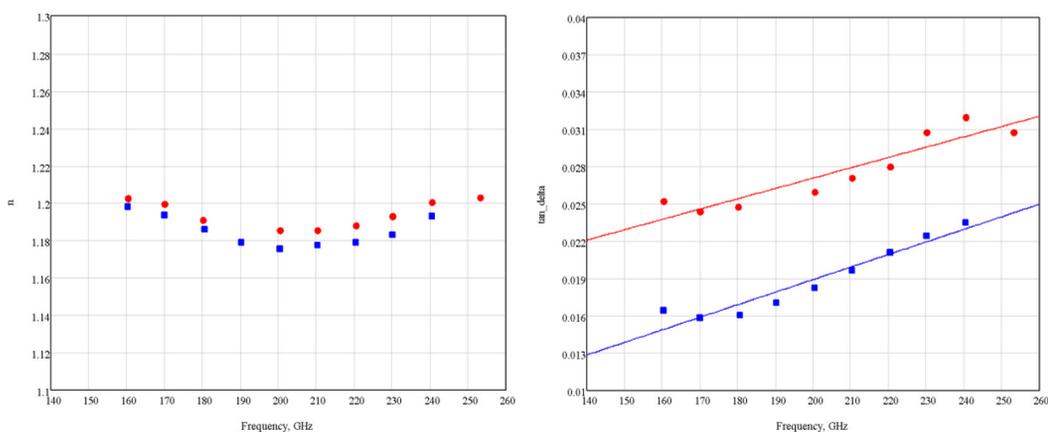


Рис. 4. Измеренные частотные зависимости (а) показателя преломления  $n$  и (б)  $\tan \delta$ : красные кружки соответствуют образцу 1 (рис. 3а), синие квадратики – образцу 2 (рис. 3б); сплошными линиями показаны соответствующие линейные аппроксимации

Fig. 4. Measured frequency dependences (a) of the refractive index  $n$  and (b) of  $\tan \delta$ : red circles correspond to sample 1 (fig. 3a), blue squares – to sample 2 (fig. 3b); solid lines show the corresponding linear approximations

Была проведена серия экспериментов по выявлению влияния влажности (адсорбированной из воздуха воды) на величины  $n$  и  $\tan \delta$ . С этой целью применяли два способа высушивания торфа перед измерениями: порошок выдерживался двое суток в атмосфере сухого азота и подогревался в резонаторе до температуры  $\sim 100$  °С в течение нескольких часов. В результате исследований не выявлено какого-либо заметного изменения поглощения в порошках при обоих указанных методах высушивания в сравнении с исходными образцами (без какой-либо обработки).

### Результаты измерений срезов керна

В данной серии экспериментов были исследованы два среза из разных мест керна карбонатных отложений, полученного из Майоровского месторождения Волго-Уральской нефтегазодобывающей провинции. Порода представляет собой карбонатный коллектор с низкими фильтрационными характеристиками. Среднее содержание нефти составляет 3,8 масс.%. Нефть характеризуется высоким содержанием смол и асфальтенов. Групповой состав образца составляет: насыщенные углеводороды – 17,2 масс.%, ароматические углеводороды – 31,4 масс.%, смолы – 31,3 масс.%, асфальтены – 20,1 масс.%.

Измерения диэлектрических характеристик проводились по методике [18, 19] с использованием симметричного резонатора. Диаметр образцов составлял 57 мм, толщина варьировала от 0,83 до 1,03 мм. На рис. 5 приведены фотографии срезов и расположение пятна засветки образцов в резонаторе. Светлые включения, которые видны на фото, соответствуют кристаллическому кварцу, темные включения – жидким углеводородам (высоковязкая нефть). Диаметр пятна засветки составлял  $\sim 12$  мм по уровню  $1/e$ , что соответствует диаметру около 30 мм по уровню потерь за пятном  $10^{-5}$ .

Результаты измерений сведены в табл. 1. Измерения проводили на резонансных частотах, которые отличаются для разных образцов из-за отличия их толщины и показателя преломле-

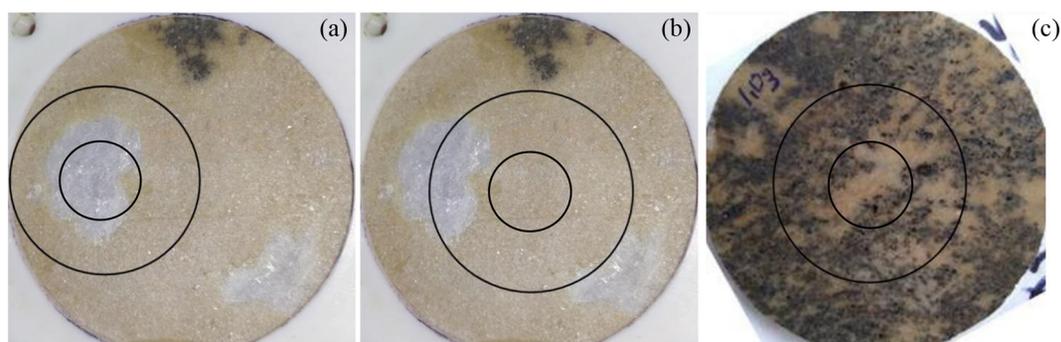


Рис. 5. Фотографии срезов из разных мест керна, демонстрирующие его сложную структуру: *a* и *b* – образцы с включением кварца; *c* – образец, содержащий высоковязкую нефть в порах. Показано расположение пятна засветки образцов в измерительном резонаторе (изображены окружности, соответствующие уровню мощности  $1/e$  и уровню потерь за пятном  $10^{-5}$ )

Fig. 5. Pictures of sections from different places of the core, showing its complex structure: *a* and *b* – samples with the inclusion of quartz, *c* – a sample containing high-viscosity oil in the pores. The location of the sample illumination spot in the measuring resonator is shown (the circles corresponding to the power level  $1/e$  and the loss level behind the spot  $10^{-5}$  are shown)

Таблица 1, Диэлектрические характеристики сечения керна для образцов

Table 1, Dielectric characteristics of the core cross-section for samples

Рисунок	Частота $f$ [ГГц]	Показатель преломления $n$	$\tan \delta$ [ $10^{-3}$ ]
Рис. 5а	136,5	2,650	11,0
Рис. 5b	145,0	2,540	7,4
Рис. 5с	113,4	2,698	25,0
Рис. 5с	169,5	2,699	28,5

ния. Следует отметить, что в данной серии экспериментов наблюдался существенно больший разброс значений величины  $\tan \delta$ , что связано со сложной структурой керна и наличием включений различных органических материалов в его разных частях. В то же время показатель преломления  $n$  практически не меняется и слабо зависит от частоты.

### Заключение

Развита методика измерения диэлектрических параметров (показателя преломления и  $\tan \delta$ ) каустобиолитов с порошковой структурой. На основе разработанной методики впервые проведены исследования диэлектрических параметров порошков торфа, а также срезов керна с нефтесодержащей породой в диапазоне частот от 140 до 260 ГГц. Определены значения показателя преломления  $n$  и  $\tan \delta$  для порошка из верхового сфагнового торфа до и после его СВЧ-переработки в процессе «мягкого» пиролиза. Показано, что показатель преломления при СВЧ-пиролизе остается практически неизменным, а поглощение заметно уменьшается. В то же время естественная влажность образцов торфа слабо влияет на СВЧ-поглощение. Показатель преломления имеет слабую частотную зависимость в ис-

следуемом диапазоне, а зависимость  $\tan \delta$  от частоты хорошо аппроксимируется линейной функцией.

В случае нефтесодержащих кернов его сложная структура приводит к сильной неоднородности потерь как от места среза образца, так и по его площади. Разброс измеренных величин в различных срезах нефтесодержащих кернов может достигать до 30 %. В то же время показатель преломления (аналогично случаю порошков торфа) практически не меняется в различных образцах и имеет слабую частотную зависимость.

### Благодарности / Acknowledgments

Работа выполнена в рамках госзадания ИПФ РАН 0035-2019-0001 при частичной поддержке РФФИ и правительства Нижегородской области, грант 18-42-520015 р\_а.

The work was carried out within the framework of the state task of the IAP RAS0035-2019-0001 with the partial support of the RFBR and the Government of the Nizhny Novgorod region, grant 18-42-520015 р\_а.

### Список литературы / References

1. Удалов Е.И., Болотов В. А., Танашев Ю. Ю. и др. Пиролиз жидкого гексадекана в условиях селективного нагрева катализатора СВЧ-излучением, *Теоретическая и экспериментальная химия*. 2010. Т. 46(6), С. 370. [Udalov E. I., Bolotov V. A., Tanashev Yu. Yu., et al. Pyrolysis of liquid hexadecane under conditions of selective heating of the catalyst by microwave radiation, *Theoretical and Experimental Chemistry*, 2010, Vol. 46(6), P 370. (In Russ.)]
2. Рыжков А.Ф., Попов А.В., Богатова Т.Ф. и др. Эффективность современных способов конверсии низкосортных топлив в электроэнергетике. *Омский научный вестник*, 2010, Т. 3(93), С. 176. [Ryzhkov A. F., Popov A. V., Bogatova T. F., et al. Efficiency of modern methods of conversion of low-grade fuels in the electric power industry, *Omsk Scientific Bulletin*, 2010, Vol. 3 (93), P. 176. (In Russ.)]
3. Гунич С.В., Янчуковская Е.В., Днепровская Н.И. Технология микроволновой карбонизации органических компонентов твердых бытовых отходов. *Известия ВУЗов, Прикладная химия и биотехнология*, 2011. № 1, С134. [Gunich S. V., Ianchukovskaia E. V., Dneprovskaiia N. I. Technology of microwave carbonation of organic components of solid household waste, *Izvestiya Vuzov. Prikladnaya Khimiya i Biotekhnologiya*, 2011. No. 1, P. 134. (In Russ.)]
4. Бутовский М.Э. Пути утилизации промышленных отходов большого города на современном этапе, *Вестник ИрГТУ*, 2011, Т. 50(3), Р 91. [Butovskii M. E. Ways of utilization of industrial waste of the big city at the present stage, *Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2011. Vol. 50(3), P 91. (In Russ.)]
5. Яцун А.В., Коновалов Н.П., Ефименко И.С. Жидкие продукты пиролиза отработанных автомобильных шин под воздействием СВЧ. *Химия твердого топлива* 2013. № 4, С. 60. [Iatsun A. V., Konovalov N. P., Efimenko I. S.. Liquid pyrolysis products of used car tires under the influence of microwave, *Solid Fuel Chemistry*, 2013, No. 4, P. 60. (In Russ.)]
6. Abdulrahman I., Máša V., Teng S. Y., Process intensification in the oil and gas industry: A technological framework, *Chemical Engineering and Processing*, 2021, V. 159, 108208.
7. Гапонов А.В., Петелин М.И., Юлпатов В.К. Индуцированное излучение возбужденных классических осцилляторов и его использование в высокочастотной электронике. *Изв. ВУ-*

Зов. *Радиофизика*. 1967. Т. 10(9), С. 1414–1453. [Gaponov A. V., Petelin M. I., Yulpatov V. K.. Induced radiation of excited classical oscillators and its use in high-frequency electronics. *Radiophysics and Quantum Electronics*. 1967. Vol. 10(9), P. 1414–1453. (In Russ.)]

8. Nusinovich G.S., Thumm M.K.A., Petelin M.I. The Gyrotron at 50: Historical Overview. *J. Infrared Milli Terahz Waves*, 2014. No 35, P. 325–381.

9. Thumm M. State-of-the-art of high power gyro-devices and free electron masers. *J. Infrared Millim. Terahertz Waves*, 2020, Vol. 41(1), 1.

10. Быков Ю.В., Еремеев А.Г., Глявин М.Ю. и др. Исследовательский гиротронный комплекс миллиметрового диапазона длин волн. *Изв. вузов. Радиофизика*. 2018. Т. 61(10), С. 843. [Bykov Yu. V., Eremeev A. G., Glyavin M. Yu., etc. Research gyrotron complex of the millimeter wavelength range, *Radiophysics and Quantum Electronics*. 2018. Vol. 61(10), P. 843. (In Russ.)]

11. Официальный сайт ЗАО НПП Гиком <http://www.gycom.ru/products.html>.

12. Bykov Y.V., Egorov S.V., Eremeev A.G. et al. Flash Microwave Sintering of Transparent Yb:(LaY)<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Ceramics. *Journal of American Ceramical Society*, 2015, Vol. 98(11), 3518.

13. Vikharev A.L., Gorbachev A.M., Kozlov A.V. et al. Diamond films grown by millimeter wave plasma-assisted CVD reactor. *Diamond and related materials*, 2006, № 15, pp. 4–8, 502.

14. Denisov G.G., Glyavin M. Yu., Tsvetkov A.I. et al. 45GHz/20kW gyrotron-based microwave setup for fourth generation of ECR ion source, *IEEE Trans. On Electr. Devices*, 2018, Vol. 65(9), 3963.

15. Thumm M.K.A., Denisov G. G., Sakamoto K., Tran M. Q.. High-power gyrotrons for electron cyclotron heating and current drive. *Nuclear Fusion*, 2019, Vol. 59 (7), 073001.

16. Cullen A.L., Yu P.K. The Accurate Measurement of Permittivity by Means of an Open Resonator. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*, 1971, Vol. 325(1563), 493.

17. Cook R.J., Jones R.G. Correction to open-resonator permittivity and loss measurements. *Electronics Letters*, 1976, Vol. 12(1), 1–2.

18. Dryagin Yu.A., Parshin V.V. A method to measure dielectric parameters in 5÷0,5 mm wavelength band. *International Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 1992, Vol. 13(7), 1023–1032.

19. Власов С.Н., Копосова Е.В., Мазур А.Б., Паршин В.В. Об измерении диэлектрической проницаемости резонансным методом. *Изв. ВУЗов. Радиофизика*. 1996. Т. 39(5), С. 615. [Vlasov S. N., Kopusova E. V., Mazur A. B., Parshin V. V. On the measurement of dielectric permittivity by the resonant method, *Radiophysics and Quantum Electronics*, 1996, Vol. 39(5), P. 615. (In Russ.)]

20. Зайченко В.М., Князева М.И., Крылова А.Ю., Крысанова К.О., Куликов А.Б. Физико-химические свойства биоугля, полученного мягким пиролизом торфа. *Химия твердого топлива*. 2019. № 3, С. 34–40. [Zaichenko V.M., Knyazeva M.I., Krylova A. Yu., Krysanova K. O., Kulikov A.B. Physical and chemical properties of biochar obtained by soft pyrolysis of peat. *Solid Fuel Chemistry*, 2019, No. 3), P. 34–40. (In Russ.)].