

Вестник Томского государственного
архитектурно-строительного университета.
2024. Т. 26. № 6. С. 133–145.

ISSN 1607-1859 (для печатной версии)
ISSN 2310-0044 (для электронной версии)

Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo
arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta –
Journal of Construction and Architecture.
2024; 26 (6): 133–145.

Print ISSN 1607-1859
Online ISSN 2310-0044

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 691.327.333

DOI: 10.31675/1607-1859-2024-26-6-133-145

EDN: MWDHCV

ТЕРАГЕРЦОВАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

**Юрий Сергеевич Саркисов, Николай Петрович Горленко,
Дмитрий Юрьевич Саркисов, Ольга Александровна Зубкова**

*Томский государственный архитектурно-строительный университет,
г. Томск, Россия*

Аннотация. *Актуальность.* Импульсная терагерцовая спектроскопия получила широкое распространение в научных исследованиях быстропротекающих процессов в различных структурах на нано-, мезо- и макроуровнях. В строительных технологиях терагерцовое излучение до самого последнего времени практически не применялось. С развитием теории и практики терагерцовой спектроскопии ее способы могут успешно дополнять классические методы физико-химического анализа строительных материалов различного технического назначения, особенно теплоизоляционных в широком диапазоне плотности и электроизоляционных свойств. Наиболее актуальны данные исследования в настоящее время в связи с разработкой составов и технологий эффективных теплоизоляционных материалов на основе отходов целлюлозно-бумажной промышленности, в том числе различных видов некондиционного сырья.

Цель работы – обосновать применение терагерцовой спектроскопии в изучении механизмов формирования структур твердения строительных материалов различной природы.

Методы. При проведении исследований для изучения механизма протекающих процессов использован метод терагерцовой спектроскопии и структурно-механические методы анализа.

Результаты. Установлено, что наиболее высокими эксплуатационными характеристиками обладает система на основе модифицированного полиуретана и бумажного наполнителя. Показано, что наиболее сильное поглощение терагерцового излучения в исследуемых образцах наблюдается в области частот выше 1–2 ТГц.

По результатам проведенных исследований сделан вывод о существовании корреляции между величиной теплопроводности и коэффициентом поглощения образца.

Ключевые слова: терагерцовая спектроскопия, строительные материалы, теплоизоляционные материалы, полиуретановые полимеры, картон типа МС-5Б, наноразмерные добавки, прочность, водостойкость, плотность

Для цитирования: Саркисов Ю.С., Горленко Н.П., Саркисов Д.Ю., Зубкова О.А. Терагерцовая спектроскопия строительных материалов // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2024. Т. 26. № 6. С. 133–145. DOI: 10.31675/1607-1859-2024-26-6-133-145. EDN: MWDHCV

ORIGINAL ARTICLE

**TERAHERTZ SPECTROSCOPY
OF CONSTRUCTION MATERIALS****Yuri S. Sarkisov, Nikolay P. Gorlenko, Dmitry Y. Sarkisov,
Olga A. Zubkova***Tomsk State University of Architecture and Building, Tomsk, Russia*

Abstract. Pulsed terahertz spectroscopy is widely used in scientific research of fast processes in various structures at nano-, meso- and macrolevels. Terahertz radiation has not been not applied in construction technologies until very recently. With the development of terahertz spectroscopy, it successfully complements classical methods of physical and chemical analysis of building materials for various engineering purposes, especially for heat-insulating materials in a wide range of density and electrical insulating properties. These studies are currently relevant for the development of compositions and technologies of effective thermal insulation materials based on wastes of the pulp and paper industry, including various types of substandard raw materials.

Purpose: The aim of the work is to substantiate the application of terahertz spectroscopy in studying the formation of curing structures of building materials of different nature.

Methodology: Terahertz spectroscopy and strength analysis to study ongoing processes.

Research findings: It is found that the system based on modified polyurethane and paper filler, has the highest performance characteristics. It is shown that the highest absorption of terahertz radiation in the samples occurs in the frequency range above 1 to 2 THz.

Keywords: terahertz spectroscopy, building materials, thermal insulation, polyurethane polymers, MS-5 cardboard, nanoscale additives, strength, water resistance, density

For citation: Sarkisov Yu.S., Gorlenko N.P., Sarkisov D.Yu., Zubkova O.A. Terahertz Spectroscopy of Construction Materials. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2024; 26 (6): 133–145. DOI: 10.31675/1607-1859-2024-26-6-133-145. EDN: MWDHCV

В России ежегодно образуется около 8 млн т бумажных отходов, но перерабатывается в настоящее время только 4,1 млн т. Для сравнения: в Китае ежегодно поставляется около половины всего мирового объема бумажного сырья для дальнейшей переработки. Целлюлозная промышленность в Китае рентабельна и приносит ощутимые прибыли. В Европейском союзе ежегодно образуется 11 млн т отходов, из которых только 70 % приходится на переработку бумаги [1]. В настоящее время в нашей стране не хватает производственных мощностей для утилизации и переработки уже существующих накоплений бумажных отходов. Значительная часть отходов подвергается гниению и является одним из загрязнителей окружающей среды. В этой связи актуальным остается разработка составов и технологий использования отходов целлюлозно-бумажной промышленности для создания и производства строительных материалов различного технического назначения. Наибольшее распространение среди них получили теплоизоляционные материалы, например эковата. Состав этого утеплителя содержит 81 % переработанной целлюлозы, 7 % тетрабората натрия и 12 % природных антисептиков [2].

Главным недостатком целлюлозно-бумажного наполнителя является высокое значение водопоглощения и низкая водостойкость. Эта задача решается путем применения традиционных гидрофобных составов. Предпринимаются попытки

расширить ассортимент экологически чистых гидрофобизаторов. Например, неорганические наночастицы SiO_2 , нанесенные на нановолокна целлюлозы [3].

В работе [4] предлагается гидрофобное покрытие, основанное на сочетании натурального каучукового латекса и бутилстеарата. Составы способствуют значительному снижению показателя водопоглощения с 128 до 0,8 г/м². Второй важный компонент при получении композитов – связующее. Здесь можно выделить синтетические связующие, большинство из которых – гидрофобные вещества. Их основными недостатками являются чувствительность к изменению температуры и ограниченная механическая прочность. Необходимо отметить, что неорганические вяжущие, такие как цемент, гипс и известь, значительно уступают полимерным связующим из-за придания создаваемым материалам повышенной плотности. Многочисленные исследования как отечественных, так и зарубежных ученых, в том числе и предварительные эксперименты, проведенные авторами настоящей работы, показали, что даже в поризованных цементных системах не удается одновременно обеспечить, с одной стороны, низкую плотность, а с другой – высокую прочность и водостойкость образцов цементного камня. В этой связи в качестве связующих широко применяют клеи и адгезивы различного состава органической природы, такие как мочевино-меламино-формальдегидная смола, вулканизирующий каучуковый клей, казеин, мочевиноформальдегидная смола, поливинилацетат, поливиниловый спирт и др.

До недавнего времени для исследования механизма протекающих процессов в рассматриваемых материалах широко применялись в основном методы ИК-спектроскопии. Терагерцовая спектроскопия начала развиваться сравнительно недавно.

Целью настоящей работы ставилось обосновать применение терагерцовой спектроскопии в изучении механизмов формирования структур твердения строительных материалов различной природы.

С целью изучения механизма взаимодействия связующего с бумажным наполнителем проводили спектральные исследования на импульсном терагерцовом спектрометре T-Spec 1000 (Teravil, Литва) с приемником в виде фотопроводящих дипольных антенн на основе LT-GaAs. Прибор характеризуется высокими спектральным разрешением (до 1 ГГц) и динамическим диапазоном (не менее 90 дБ на частоте 400 ГГц), широким спектральным диапазоном (до 5 ТГц). Такие характеристики позволили на образцах толщиной 1–2 см с высокой степенью (локальной) неоднородности получить временные формы терагерцовых импульсов, прошедших сквозь образец.

Импульсная терагерцовая спектроскопия во временной области (THz-TDS) стала стандартным инструментом научных лабораторий для исследования быстропротекающих процессов в полупроводниковых структурах [5, 6], измерения диэлектрических свойств различных сред, спектроскопии колебательных спектров молекулярных и кристаллических структур, в том числе наноразмерных и композитных материалов [7, 8]. В предыдущие годы было продемонстрировано, что терагерцовые технологии, в частности импульсная терагерцовая спектроскопия, могут применяться для контроля толщины лакокрасочных покрытий в автомобилестроительной, строительной и кораблестроительной индустрии, для определения однородности и химического состава фармацевтиче-

ской продукции, состава и структуры предметов искусства и археологических объектов и т. п.

В строительной технологии терагерцовое излучение может применяться для определения плотности используемых материалов, поиска пустот и пор, определения наличия воды (сырости) в конструкциях, поиска внутренних металлических объектов, таких как арматура [9, 10, 11, 12, 13]. Кроме того, непосредственно определение показателей преломления и коэффициентов поглощения, или эквивалентно действительной и мнимой частей диэлектрической проницаемости, строительных материалов может представлять интерес, т. к. в этом диапазоне частот накопление базы соответствующих спектров долгое время было затруднено из-за отсутствия необходимых экспериментальных инструментов. В частности, такие спектральные данные интересны в связи с развитием беспроводных технологий связи, которые начинают использовать нижние терагерцовые частоты для повышения скорости передачи данных [12].

Терагерцовые методы измерений могут успешно дополнять классические методы, основанные на теплопереносе [7] или просвечивании рентгеновским излучением. При этом, как правило, используемые в строительстве материалы, в частности полученные в настоящей работе образцы теплоизоляционных материалов, являясь неоднородными по составу и представляют собой композиты (состоящие из двух и более материалов с различными диэлектрическими свойствами). Для описания их диэлектрических свойств необходимо применять модель эффективной среды [7] и учитывать влияние рассеяния излучения на неоднородностях. Применение стандартной обработки первичных данных терагерцовой спектроскопии (т. е. принимая среду однородной и характеризуемой интегральными параметрами) также дает много полезной информации как для разработки методов контроля для внелабораторного применения, так и непосредственно для разработки строительных материалов и технологии их получения.

В настоящей работе исследовались образцы теплоизоляционных материалов на основе отходов целлюлозно-бумажной промышленности. В качестве бумажного наполнителя использовались отходы гофрированного картона марки МС-5Б. Неорганическими вяжущими служили быстротвердеющий цемент марки М-500 (ЦЕМ 47,5). В качестве полимерных связующих применяли элементарную серу, полиэтилентерефталат, модифицированный цементом с добавкой наноразмерного оксида кремния, полиуретан (МПУ).

Бумажный наполнитель вводили в вяжущее неорганической природы (цемент, гипс), перемешивали до однородной массы и формировали образцы – кубики размером $(2 \times 2 \times 2) 10^{-3}$ м. Через 7 сут твердения образцы подвергались испытанию на прочность, водостойкость и водопоглощение. Прочность при сжатии определяли на гидравлическом прессе типа ВНИР на стандартных образцах, водопоглощение, водостойкость (коэффициент размягчения), коэффициент теплопроводности – по стандартными методикам. Коэффициент конструктивного качества (ККК) определяли как отношение прочности на сжатие к плотности материала.

Результаты испытаний исследуемых образцов представлены в таблице.

Результаты испытаний исследуемых образцов

Examples of test results

Тип связующего. Состав: БН:СВ, масс. %	Плотность, г/см ³	Прочность при сжатии, МПа	Водопо- глощение, %	Коэффици- ент водо- стойкости	ККК·10 ⁴ , см
Цемент (10:90)	1,31	8,1	18,0	0,62	6,2
Цемент (10:90) поризованный	0,91	6,8	38,0	0,48	7,5
Элементарная сера (30:70)	1,73	34,8	3,2	0,99	20,1
Полиэтилентерефта- лат (30:70)	1,32	21,4	0,5	0,98	16,2
МПУ (30:70)	0,37	11,0	0,5	0,97	29,7
МПУ (30:70) прессованный образец	0,42	14,0	0,4	0,98	33,3

Измерения проводились на импульсном терагерцовом спектрометре, оснащённом двумя линиями задержки, терагерцовым эмиттером и приемником в виде фотопроводящих дипольных антенн на основе LT-GaAs.

На рис. 1–5 показаны временные формы опорных импульсов: без образца на пути терагерцовых импульсов – панели *a* и прошедших образец – панели *b*, а также частотные формы этих импульсов, полученные из временных форм с помощью преобразования Фурье (панели *б* и *в* соответственно).

Из сравнения спектров, представленных на панелях *б* и *в* (рис. 2–5), можно отметить сильное поглощение терагерцового излучения, особенно в области частот выше 1–2 ТГц. Это говорит о том, что для построения изображений, или реализации терагерцовой томографии подобных образцов, необходимо применять частоты в диапазоне 50–450 ГГц. Это соответствует данным, полученным в работах [9, 10, 11, 12, 13]. Модуляция временных форм на частоте 1,83 ТГц (и ее второй гармонике 3,67 ТГц), которая явно видна на рис. 2–5, панели *в* и *з*, является эффектом измерительной схемы и не является характеристикой материала.

В образце № 1 (рис. 2, *в*) заметно небольшое прохождение терагерцового импульса практически без задержки. Наблюдаются максимумы на временных формах опорного сигнала и импульса, прошедшего образец, при одном значении $t = 22$ пс (рис. 2, *a*, *в*), что говорит о том, что в образце имеются пустоты. Образец № 1 является наименее плотным среди измеренных. Сигнал, прошедший образец, содержит спектральные компоненты с амплитудами, превышающими уровень шума, до частоты около 2 ТГц (рис. 2, *з*). Максимальное пропускание наблюдается на частоте вблизи 170 ГГц (рис. 2, *з*), тогда как максимум спектральной интенсивности опорного сигнала находится на частоте 420 ГГц (рис. 2, *б*). Для упрощенной оценки значения показателя преломления можно воспользоваться формулой $n = \Delta t \cdot c/d + 1$, где Δt – временная задержка между импульсами, прошедшими образец, и воздушный зазор той же толщины d (разность значений t , при которых наблюдается максимальная по модулю напряженность поля терагерцового сигнала на рис. 2, *a* и *в*), c – скорость света в вакууме. Для образца № 1 рассчитанный таким образом показатель преломления $n = 1,28$.

№ 1, $d = 16370$ мкм№ 2, $d = 16970$ мкм№ 3, $d = 20250$ мкм№ 4, $d = 19970$ мкм

Рис. 1. Фотографии экспериментальных образцов и их толщины
Fig. 1. Photographs of experimental samples with different thicknesses

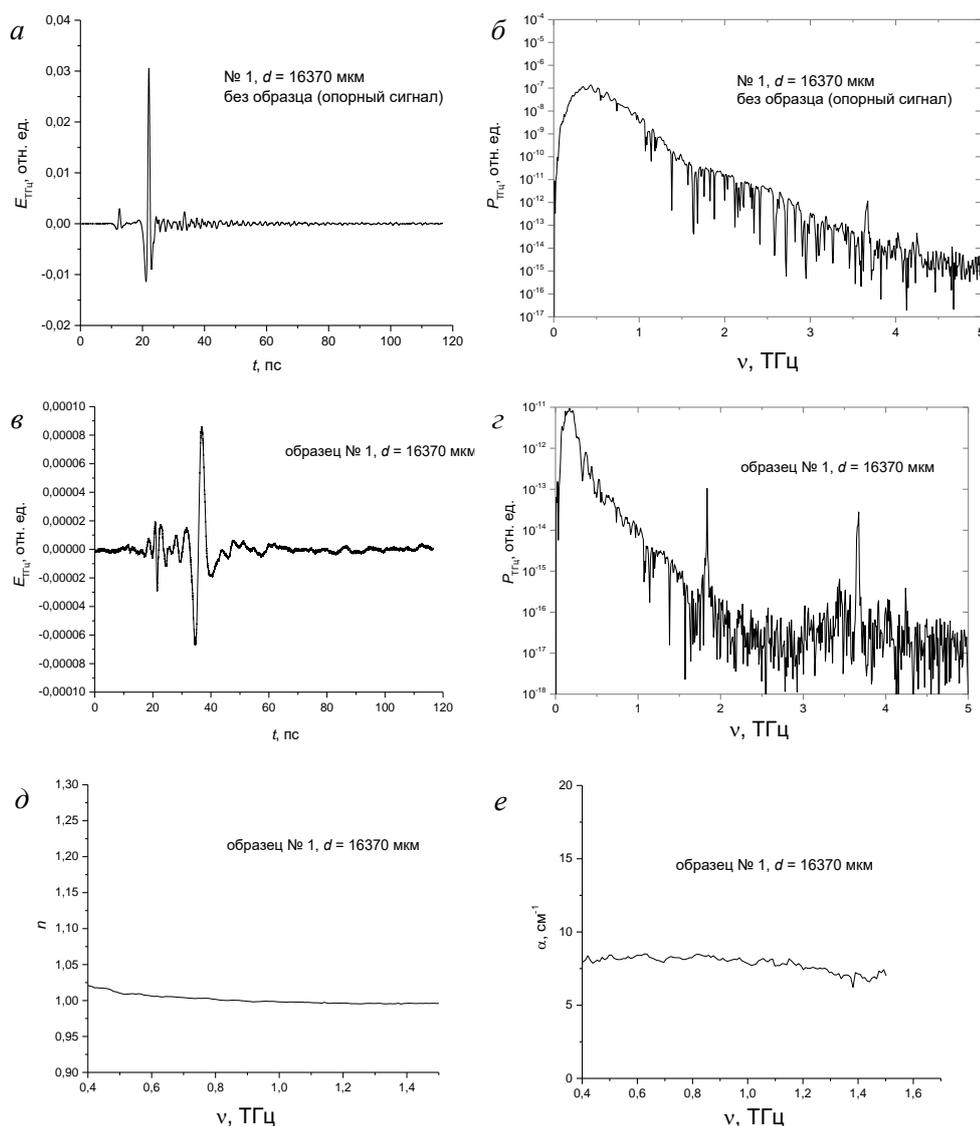


Рис. 2. Временные (а) и частотные формы опорного сигнала (б) и сигнала, прошедшего образец № 1 (в, г), а также рассчитанные спектральные зависимости интегрального показателя преломления (д) и коэффициента поглощения по интенсивности (е)

Fig. 2. Time (a) and frequency (b) curves of reference signal and signal passed through sample 1 (c) and calculated spectral dependences of the integral refractive index (d) and absorption coefficient (e)

Спектр показателя преломления, полученный при стандартном анализе данных импульсной терагерцовой спектроскопии при использовании оконной функции Блэкмана [5], но без учета неоднородности образца, показан на рис. 2, д. В настоящей работе для расчетов использовалась специализированная программа TeraLyzer (LyTera, Германия) [14]. Аналогично с использованием упрощенной формулы для расчета усредненного по частотам коэффициента погло-

щения $\alpha = -\ln(E/E_0)^2/d$, где E и E_0 – максимальная по модулю напряженность поля терагерцового сигнала для импульса, прошедшего через образец, и опорного импульса соответственно (рис. 2, а и в), можно получить значение $\alpha = 21 \text{ см}^{-1}$. Рассчитанный в рамках более строгого подхода спектр показателя преломления представлен на рис. 2, е.

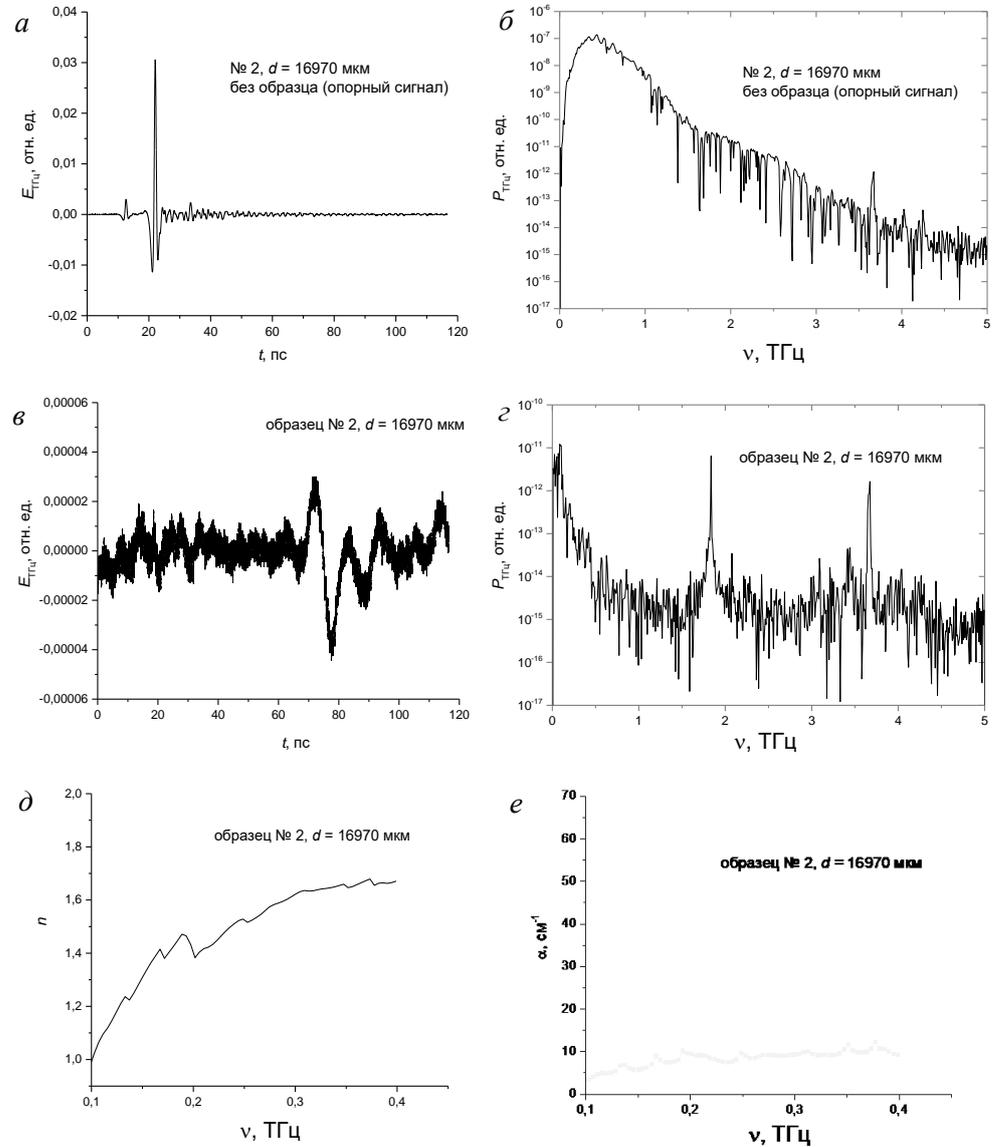


Рис. 3. Временные (а) и частотные формы опорного сигнала (б) и сигнала, прошедшего образец № 2 (в, г), а также рассчитанные спектральные зависимости интегрального показателя преломления (д) и коэффициента поглощения по интенсивности (е)

Fig. 3. Time (a) and frequency (b) curves of reference signal and signal passed through sample 2 (c, d) and calculated spectral dependences of the integral refractive index (e) and absorption coefficient (f)

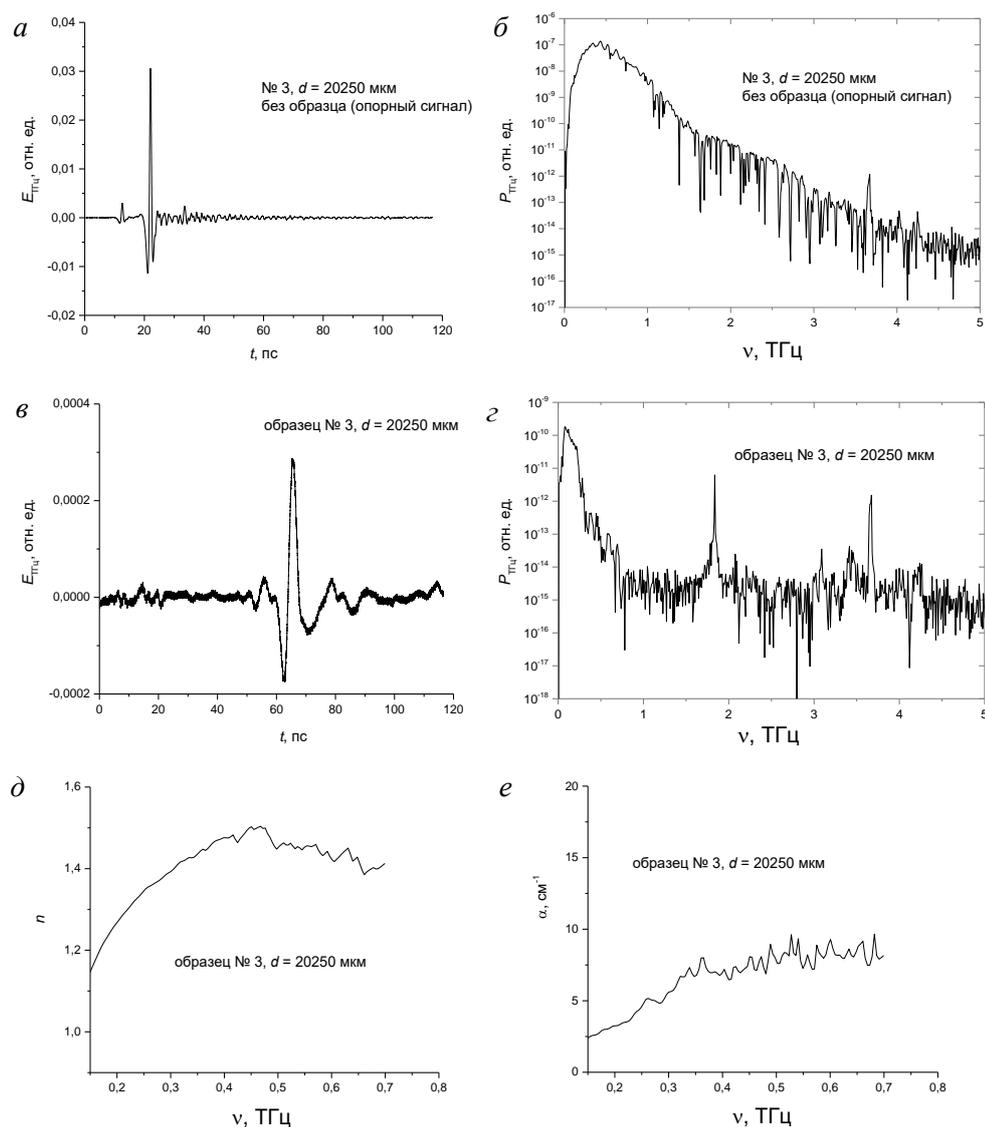


Рис. 4. Временные (а) и частотные формы опорного сигнала (б) и сигнала, прошедшего образец № 3 (в, г), а также рассчитанные спектральные зависимости интегрального показателя преломления (д) и коэффициента поглощения по интенсивности (е)

Fig. 4. Time (a) and frequency (b) curves of reference signal and signal passed through sample 3 (c, d) and calculated spectral dependences of the integral refractive index (e) and absorption coefficient (f)

Для образца № 2 (рис. 3) ослабление терагерцового сигнала становится более сильным. Сигнал, прошедший образец, содержит спектральные компоненты с амплитудами, превышающими уровень шума, до частоты около 450 ГГц (рис. 3, г), а максимальное пропускание наблюдается на частоте вблизи 90 ГГц (рис. 3, г). Упрощенные оценки, как описано выше, дают значения показателя преломления $n = 1,88$ и коэффициента поглощения $\alpha = 27 \text{ см}^{-1}$. Рассчи-

танные в рамках более строгого подхода [5, 14] спектры показателя преломления и коэффициента поглощения приведены на рис. 3, д и е соответственно.

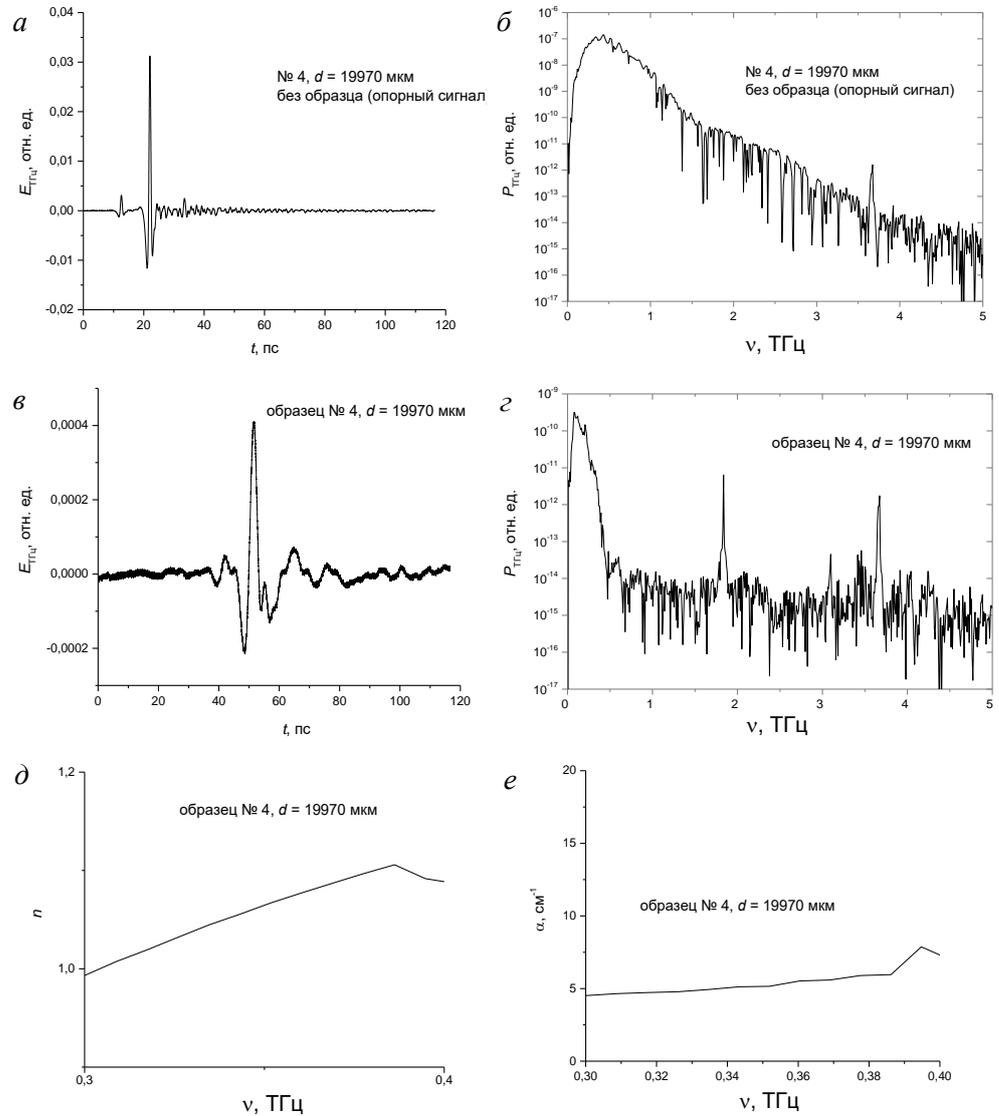


Рис. 5. Временные (*a*) и частотные формы опорного сигнала (*б*) и сигнала, прошедшего образец № 4 (*в*, *г*), а также рассчитанные спектральные зависимости интегрального показателя преломления (*д*) и коэффициента поглощения по интенсивности (*е*)

Fig. 5. Time (*a*) and frequency (*b*) curves of reference signal and signal passed through sample 4 (*c*, *d*) and calculated spectral dependences of the integral refractive index (*e*) and absorption coefficient (*f*)

Аналогично в образце № 3 сигнал, прошедший образец, содержит спектральные компоненты с амплитудами, превышающими уровень шума, до частоты около 720 ГГц (рис. 4, *з*), а максимальное пропускание, как и для образца

№ 2, наблюдается на частоте вблизи 90 ГГц (рис. 4, *з*). Упрощенные оценки, как описано выше, дают значения показателя преломления $n = 1,64$ и коэффициента поглощения $\alpha = 11 \text{ см}^{-1}$. Рассчитанные в рамках более строгого подхода спектры показателя преломления и коэффициента поглощения показаны на рис. 4, *д* и *е* соответственно.

Для образца № 4 сигнал, прошедший образец, содержит спектральные компоненты с амплитудами, превышающими уровень шума, до частоты около 450 ГГц (рис. 5, *з*), а максимальное пропускание, как и для образца № 2, наблюдается на частоте вблизи 80 ГГц (рис. 5, *з*). Упрощенные оценки, как описано выше, дают значения показателя преломления $n = 1,45$ и коэффициента поглощения $\alpha = 9 \text{ см}^{-1}$.

Принимая во внимание полученные в настоящей работе данные, в частности, можно ожидать, что среди исследованных образцов теплоизоляционных материалов наименьшей теплопроводностью будет обладать состав № 4, а наибольшей – состав № 2. Такой качественный вывод может следовать из существующей корреляции между величинами теплопроводности и коэффициентов поглощения. Существование такой корреляции согласуется с экспериментальными данными.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Monte M. C., Fuente E., Blanco A., Negro C. Waste management from pulp and paper production in the European Union // Review Waste Manag. 2009. P. 293–308. URL: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2008.02.002>
2. Эковата – утеплитель из бумаги. Особенности, характеристики и свойства. URL: <https://ekovata-msk.ru/stati/ekovata-uteplitel-iz-bumagi/> (дата обращения: 17.06.2024).
3. Bang J., Choi H.Y., Ahn K.-S., Yeo H., Oh J.-K., Kwak H.W. Sustainable cellulose nanofiber/hydrophobic silica nanoparticle coatings with robust hydrophobic and water-resistant properties for wood substrates // Appl. Surf. Sci. 2024. V. 654. 159419. URL: <https://doi.org/10.1016/j.apusc.2024.159419>
4. Kunam P.K., Anushikha, Gaikwad K.K. Water resistant paper based on natural rubber latex from Hevea brasiliensis andbutyl stearate hydrophobic coating for packaging applications // Industrial Crops and Products. 2023. V. 205. 117480. URL: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2023.117480>
5. Иванова Н.В. Математическая обработка ИК-спектра // Журнал прикладной спектроскопии. 1989. 51. № 2. С. 301–306.
6. Moghadam S.G., Momen G., Bakhshandeh E., Jafari R. To be or not to be a hydrophobic matrix? The role of coating hydrophobicity on anti-icing behavior and ions mobility of ionic liquids // Chemical Engineering Journal. 2024. V. 485. 149696. URL: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2024.149696>
7. Варено Л.Г. Исследование свойств бумаги методом ИК-спектроскопии // Фундаментальные исследования. 2007. Т. 12. С. 463–464. URL: <https://fundamental-research.ru/ru/article/view?id=4369> (дата обращения: 29.04.2024).
8. Ешбаева У.Ж., Джалилов А.А. ИК-спектроскопические исследования свойств бумаг со связующими полимерами // Universum: технические науки. 2022. № 1 (94). URL: <https://doi.org/10.32743/UniTech.2022.94.1.12936> (дата обращения: 08.06.2024).
9. Михалева М.Г. Суперспирализованные анизометрические фазы в системах биомиметиков и целлюлозе : специальность 03.01.02 : диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук. Москва, 2017. 135 с.
10. Grunin Y.B., Grunin L.Yu., Schiraya V.Yu., Ivanova M.S., Masas D.S. Cellulose–water system’s state analysis by protonnuclear magnetic resonance and sorption measurements // Bioresources and Bioprocessing. 2020. V. 7. № 1. P. 1–11. URL: <https://doi.org/10.1186/s40643-020-00332-8>
11. Abina A., Puc U., Jeglič A., Zidanšek A. Applications of terahertz spectroscopy in the field of construction and buildingmaterials // Appl. Spectrosc. Rev. 2014. V. 50. № 4. P. 279–303.

12. *Abina A., Puc U., Jeglič A., Zidanšek A.* Structural characterization of thermal building insulation materials using terahertz spectroscopy and terahertz pulsed imaging // *NDT & E Int.* 2016. V. 77. P. 11–18. DOI:10.1016/j.ndteint.2015.09.004
13. *Jepsen P.U., Cooke D.G., Koch M.* Terahertz spectroscopy and imaging – Modern techniques and applications // *Las. Phot.Rev.* 2011. V. 5. № 1. P. 124–166. URL: <https://doi.org/10.1002/lpor.201200505>
14. *Yang Y., Wu T.V., Sempey A., Pradere C., Sommier A., Batsale J.-C.* Combination of terahertz radiation method and thermal probe method for non-destructive thermal diagnosis of thick building walls // *Energy Build.* 2018. V. 158. P. 1328–1336. URL: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.11.029>

REFERENCES

1. *Monte M.C., Fuente E., Blanco A., Negro C.* Waste Management from Pulp and Paper Production in the European Union. *Waste Management.* 2009; 29 (1): 293–308. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2008.02.002>
2. Ecowool – insulation made of paper. Features, characteristics and properties Available: <https://ekovata-msk.ru/stati/ekovata-uteplitel-iz-bumagi/> (accessed June 17, 2024).
3. *Bang J., Choi H.Y., Ahn K.-S., Yeo H., Oh J.-K., Kwak H.W.* Sustainable Cellulose Nanofiber/Hydrophobic Silica Nanoparticle Coatings with Robust Hydrophobic and Water-Resistant Properties for Wood Substrates. *Applications of Surface Science.* 2024; 654: 159419. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2024.159419>
4. *Kunam P.K., Anushikha, Gaikwad K.K.* Water Resistant Paper Based on Natural Rubber Latex from Hevea Brasiliensis and Butyl Stearate Hydrophobic Coating for Packaging Applications. *Industrial Crops and Products.* 2023; 205: 117480. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2023.117480>
5. *Ivanova N.V.* Mathematical Processing of IR Spectrum. *Journal of Applied Spectroscopy.* 1989; 51 (2): 301–306.
6. *Moghadam S.G., Momen G., Bakhshandeh E., Jafari R.* To Be or Not to Be a Hydrophobic Matrix? The Role of Coating Hydrophobicity on Anti-Icing Behavior and Ions Mobility of Ionic Liquids. *Chemical Engineering Journal.* 2024; 485: 149696. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2024.149696>
7. *Varepo L.G.* Study of Paper Properties by IR Spectroscopy. *Fundamental'nye issledovaniya.* 2007; 12: 463–464. (In Russian)
8. *Eshbaeva U.Zh., Dzhalilov A.A.* IR Spectroscopic Studies of the Properties of Papers with Polymer Binders. *Universum: tekhnicheskie nauki.* 2022; (94) 1. (In Russian)
9. *Mikhaleva M.G.* Supercoiled Anisometric Phases in Biomimetic Systems and Cellulose. PhD Thesis. Moscow. 2017. 135. 16 p. (In Russian)
10. *Grunin Y.B., Grunin L.Yu., Schiraya V.Yu., Ivanova M.S., Masas D.S.* Cellulose Water System's State Analysis by Protonnuclear Magnetic Resonance and Sorption Measurements. *Bioresources and Bioprocessing.* 2020; 7 (1): 1–11. <https://doi.org/10.1186/s40643-020-00332-8>. (In Russian)
11. *Abina A., Puc U., Jeglič A., Zidanšek A.* Applications of Terahertz Spectroscopy in the Field of Construction and Building Materials. *Applied Spectroscopy Reviews.* 2014. 50 (4): 279–303.
12. *Abina A., Puc U., Jeglič A., Zidanšek A.* Structural Characterization of Thermal Building Insulation Materials using Terahertz Spectroscopy and Terahertz Pulsed Imaging. *NDT&E International.* 2016; 77: 11–18. DOI:10.1016/j.ndteint.2015.09.004
13. *Jepsen P.U., Cooke D.G., Koch M.* Terahertz Spectroscopy and Imaging–Modern Techniques and Applications. *Laser and Photonics Reviews.* 2011. 5 (1): 124–166. <https://doi.org/10.1002/lpor.201200505>
14. *Yang Y., Wu T.V., Sempey A., Pradere C., Sommier A., Batsale J.-C.* Combination of Terahertz Radiation Method and Thermal Probe Method for Non-Destructive Thermal Diagnosis of Thick Building Walls. *Energy and Buildings.* 2018. 158: 1328–1336. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.11.029>

Сведения об авторах

Саркисов Юрий Сергеевич, докт. техн. наук, профессор, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, sarkisov@tsuab.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9439-1994>

Горленко Николай Петрович, докт. техн. наук, профессор, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, gorlen52@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6237-4353>

Саркисов Дмитрий Юрьевич, канд. техн. наук, доцент, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, milandd@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3657-2273>

Зубкова Ольга Александровна, канд. техн. наук, доцент, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, zubkova0506@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3621-3836>

Authors Details

Yuriy S. Sarkisov, DSc, Professor, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, sarkisov@tsuab.ru

Nikolay P. Gorlenko, DSc, Professor, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, gorlen52@mail.ru

Dmitry Y. Sarkisov, PhD, A/Professor, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, milandd@yandex.ru

Olga A. Zubkova, PhD, A/Professor, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, zubkova0506@mail.ru

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Authors contributions

The authors contributed equally to this article.
The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 29.09.2024
Одобрена после рецензирования 17.10.2024
Принята к публикации 31.10.2024

Submitted for publication 29.09.2024
Approved after review 17.10.2024
Accepted for publication 31.10.2024