

ОТЗЫВ

официального оппонента доктора физико-математических наук профессора
П. П. Боброва о диссертации Орлова Алексея Олеговича "Микроволновые свойства
переохлажденной поровой воды на частотах 11-140 ГГц", представленной на соискание
ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.03 –
"Радиофизика"

Исследование диэлектрических свойств переохлажденной капельной воды имеет большое значение для задач дистанционного зондирования атмосферы и подстилающей поверхности в полярных и субполярных регионах на частотах выше 9-10 ГГц, т.к. поглощение высокочастотного электромагнитного излучения в жидком аэрозоле и кристаллических облаках существенно различается. Имеются также сведения, что капельная вода оказывает влияние на деструкцию озона. Результаты исследования диэлектрических свойств незамерзающей воды в криогенных породах могут служить основой для развития электромагнитных методов исследования петрофизических характеристик этих пород, таких как удельная поверхность, размеры пор, распределение пор по размерам и других.

К настоящему времени имеется лишь скудная информация о диэлектрических свойствах переохлажденной воды, а на частотах выше 10 ГГц и при температурах ниже -45°C такая информация практически отсутствует. Таким образом, диссертационная работа Орлова А. О., посвященная исследованию микроволновых свойств поровой и объемной переохлажденной воды в более широких интервалах температур и частот, является **актуальной**.

В первой главе приведен обстоятельный обзор литературы по физическим свойствам переохлажденной воды в природных и искусственных пористых средах. Рассмотрены имеющиеся данные о микроволновых свойствах переохлажденной воды. Приведенный материал свидетельствует о хорошем знании автором данного вопроса. На основании анализа литературных данных автором поставлены задачи исследования.

Во второй главе рассмотрена структура пористых материалов с размерами пор порядка нескольких нанометров, рассмотрена слоистая структура воды, определены значения толщины пленок связанной воды и соотношения объемов связанной воды и воды, близкой по своим свойствам к свободной воде, в порах разных размеров. Отмечены особенности электромагнитных свойств пористых пород, которые могут приводить к ошибкам восстановления диэлектрической проницаемости поровой воды из результатов диэлектрических измерений увлажненных пород. На основании проведенного анализа

В третьей главе подробно рассмотрены все проблемы, возникающие при диэлектрических измерениях на сверхвысоких частотах и при низких температурах. В первую очередь это неоднородность диэлектрической проницаемости образца, возникающая за счет подтягивания влаги к холодному фронту в процессе понижения температуры образца. Приведены результаты экспериментального исследования некоторых методов диэлектрических измерений. На основании проведенного исследования разных методов в качестве основной была выбрана схема измерений в свободном пространстве с использованием генератора шума как источника сигнала. Такая схема позволяет существенно ослабить влияние пространственной неоднородности образца. Разработана методика обработки экспериментальных данных, позволяющая из общих электромагнитных потерь в образце выделить потери, вносимые поровой водой. Значительное внимание уделено методике подготовки образцов. Для насыщения образцов использовалась вода высокой степени очистки, что позволило устранить влияние возможного содержания растворимых солей на температуру замерзания и диэлектрические характеристики поровой воды.

Выполнен тщательный анализ погрешностей измерений. Учтено влияние большого числа различных влияющих факторов. Рассмотрены основные причины возникновения погрешностей – инструментальные погрешности, погрешности моделей, погрешности, связанные с появлением неоднородностей в исследуемых образцах. Погрешность измерения коэффициента затухания в интервале температур от 0 до $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ составила $\pm 15\%$.

Основные экспериментальные результаты исследования представлены **в четвертой главе**. Были исследованы силикатные материалы различных марок и природные материалы: цеолит, древесина сосны и песчаный грунт. Размеры гранул силикатных материалов составляли от 0,001 мм до 0,2 мм, а размеры пор – от 2 нм до 10,8 нм. Два образца силикатов имели цилиндрическую форму пор, три – сферическую.

В эксперименте обнаружено, что микроволновые свойства увлажнённых пористых сред могут изменяться в широких пределах и зависят от геометрии порового пространства, фазового состояния поровой воды в порах и долей занимаемой ею порового пространства.

Выяснено, что при неглубоком переохлаждении (примерно до $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$) электромагнитные свойства воды можно считать близкими к свойствам объёмной воды. Микроволновые свойства такой воды представляют практический интерес для оценки петрофизических свойств криогенных пород, а также при дистанционном зондировании облачности, аэрозолей, гидрометеоров и мёрзлых покровов.

Показано, что при температуре ниже $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$, когда объёмная вода термодинамически неустойчива из-за резкого увеличения скорости зародышеобразования льда разделять свойства матрицы и воды уже нельзя. В отличие от предсказания существующей ранее

модели значительное затухание в такой структуре существует до температуры -70°C . На основании полученных экспериментальных данных произведена корректировка модели.

Экспериментально обнаружен экстремум электромагнитных потерь в области температур с центром при -45°C . Автор объясняет наличие этого экстремума влиянием второй критической точки воды и подтверждает это независимыми литературными данными об экстремуме теплоемкости при постоянном давлении и изотермической сжимаемости при этой температуре.

Приведенные исследования электромагнитных потерь в природных средах и сравнение их с потерями в силикатах с известными размерами пор открывают перспективу оценки размеров пор в природных диэлектриках электромагнитными методами.

В Заключении сформулированы основные полученные результаты.

Суммируя, можно сделать вывод о том, что на основании проведенного исследования автором сделан ряд выводов, имеющих научную новизну и практическую значимость.

Достоинством работы является решение экспериментальной задачи при наличии ряда серьезных проблем: проведение измерений на сверхвысоких частотах до 140 ГГц в условиях низких температур до -70°C , а в отдельных измерениях до -190°C . При этом были решены проблемы измерения неоднородных по объему образцов, проблемы восстановления диэлектрической проницаемости поровой воды из результатов измерения диэлектрических характеристик образцов. Способы решения ряда этих проблем и полученные результаты исследования являются новыми. Обоснованными являются и положения, выносимые на защиту.

Достоверность полученных результатов подтверждается результатами измерений, проводимых различными способами, тщательным учетом погрешностей измерений, рассмотрением всех возможных причин их появления, совпадением температурного хода значений мнимой части комплексной диэлектрической проницаемости, полученных при измерениях в температурном диапазоне $0-20^{\circ}\text{C}$, с ранее опубликованными данными, полученными иными методами, а также с результатами расчётов других исследователей.

Практическая значимость заключается в усовершенствовании методики диэлектрических измерений увлажнённых дисперсных сред при низких температурах в микроволновом диапазоне. Методика открывает возможность проведения исследований переохлаждённой объёмной воды в широком частотном диапазоне от 1 до 600 ГГц. Применение в качестве объектов исследования нанопористых силикатов с известной структурой дает возможность получения новой информации о внутренней структуре естественных криогенных сред. Информация об электромагнитных свойствах переохлажденной воды может быть использована при радиозондировании поверхности криогенных объектов, а также при радиоспектроскопии природных и искусственных сред.

Наряду с достоинствами, в диссертации имеются определенные недостатки и недочеты.

1. Не вполне удачно распределен материал между разделами. Основная часть обзора литературы приведена в Главе 1, содержащей 38 стр. Литературные источники рассматриваются также в Главах 2 и 3. Основная часть содержания разделов 2.1, 2.2 и 3.1 вполне могла быть включена в основной обзор.
2. Автором для восстановления диэлектрической проницаемости воды из результатов измерения диэлектрической проницаемости образцов используется рефракционная модель. Достоинством этой модели является простота и возможность применения для многофазных сред, однако для восстановления диэлектрической проницаемости компонент смеси она не является лучшим выбором, так как дает менее точные результаты, чем другие модели (Бруггемана или Максвелла-Гарнетта).
3. Автор всегда определяет порог перколяции по косвенным признакам, на которые могут влиять другие причины, и нигде по прямому – резкому возрастанию проводимости. Поскольку получаемые таким образом значения пороговой влажности являются заниженными, то на результаты эксперимента это никак не влияет, так как исследуемые образцы имели малую влажность.
4. При выборе методов экспериментального измерения диэлектрической проницаемости автор, на мой взгляд, напрасно отвергает метод измерения параметров матрицы рассеяния с помощью векторного анализатора параметров цепей. При решении проблемы возникающих неоднородностей образца при замерзании этот метод позволил бы проводить широкополосные измерения на частотах ниже 18 ГГц с точностью около 3%.
5. Ряд экспериментальных результатов приводится в относительных единицах прошедшей мощности или выходного напряжения сигнала радиометра (рис. 1.26, 3,6, 3,11, 3,12). Представление таких данных в терминах коэффициента передачи или коэффициента излучения дало бы больше информации.
6. Имеются отдельные погрешности в оформлении. В подписях к отдельным рисункам нет полной расшифровки обозначений кривых (рис. 1.2, 4,7–4.10 диссертации, рис. 2 и 3 автореферата).

Указанные недостатки не затрагивают основных идей диссертации и положений, выносимых на защиту, не снижают научной и прикладной ценности диссертации.

Диссертация Орлова А.О. основана на исследованиях, которые проведены им самостоятельно, она выполнена на современном научно-техническом уровне и является научно-квалификационной работой, посвященной актуальной проблеме исследования электромагнитных свойств переохлажденной поровой воды.

Автореферат и опубликованные работы полно и правильно отражают содержание диссертации. Основные результаты диссертации отражены в 22 публикациях, из которых 12 - в научных журналах, рекомендованных перечнем ВАК и известны специалистам.

Работа по научной новизне, теоретической и практической значимости соответствует требованиям пунктов 9, 10, 11, 13, 14 «Положения о присуждения ученых степеней от 24.09.2013г. №842», предъявляемых к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а её автор, Орлов Алексей Олегович, заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.03 - Радиофизика

Бобров Павел Петрович,

Заведующий научно-исследовательской лабораторией диэлькометрии и петрофизики,
доктор физико-математических наук,
(специальность: 01.04.03 – "Радиофизика"),
ученое звание – профессор.

Дата: 23.03.2017

Организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Омский государственный педагогический университет" (ОмГПУ),
644099, г. Омск, наб. Тухачевского, 14.

Тел.: (381-2) 25-14-62, e-mail: mail@omgpu.ru, веб-сайт: <http://www.omgpu.ru/>

