

АЗЕРБАЙДЖАНСКАЯ РЕСПУБЛИКА

На правах рукописи

**МИКРОВОЛНОВЫЕ НЕОТРАЖАЮЩИЕ ПОКРЫТИЯ
И РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ ИЗМЕРЕНИЯ
ИХ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ И МАГНИТНЫХ
ПАРАМЕТРОВ**

Специальность: 3337.01 - Информационно-измерительные и
управляющие системы (по отраслям)

Отрасль науки: Техника

Соискатель: **Касимова Севда Расим кызы**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
доктора наук

Баку – 2021

Диссертационная работа выполнена в Азербайджанском
Техническом Университете

Научный консультант: заслуженный деятель науки,
доктор физико-математических наук,
профессор

Годжаев Эльдар Мехрали оглы

Официальные оппоненты: член-корреспондент НАНА,
доктор технических наук, профессор
Исмаилов Исмаил Махмуд оглы
доктор технических наук, профессор
Мамедов Рагим Гурбан оглы
доктор технических наук, профессор
Мамедов Джаваншир Фирудин оглы
доктор технических наук, профессор
Эфендиев Орхан Зияддин оглы

Диссертационный совет ED 2.41 Высшей Аттестационной
Комиссии при Президенте Азербайджанской Республики,
действующий на базе Азербайджанского Технического
Университета

Председатель

диссертационного совета: доктор технических наук, профессор
Касумов Вагиф Алиджавад оглы

Ученый секретарь
диссертационного совета: кандидат технических наук, доцент
Фархадов Вахид Гара оглы

Председатель

научного семинара: доктор технических наук, доцент
Абдуллаев Намик Тахир оглы



ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В настоящее время все актуальней становится задача по разработке микроволновых неотражающих покрытий в различных областях науки и техники. Необходимость в ее решении возникает при создании просветляющих покрытий для индикации неотражающих летящих объектов, защитных антирадарных неотражающих покрытий, обеспечивающих укрытие объектов от их светового обнаружения, контроля скорости движущего объекта, гашения вредного воздействия микроволнового излучения на биоткани, усиления систем аккумуляции солнечной энергии, просветления тепловых приемников электромагнитного излучения, создания точных методов измерения диэлектрических и магнитных свойств веществ, методов дистанционного измерения контроля параметров сред, а также в оптике, для получения четкого представления изображения оптическими приборами.

Применяемые в микроволновой технике неотражающие поглотители электромагнитного излучения формируются, как правило, на основе слоистых поглощающих диэлектриков или слоя матричного непоглощающего материала (керамика, полимер) с введением в него в качестве наполнителей высокодисперсных металлических или ферромагнитных веществ. При этом полное поглощение падающего излучения в широком частотном интервале обеспечивается подбором толщины и свойств веществ покрытия, а также определенным распределением концентрации наполнителей по толщине слоя поглотителя. Из технологических и конструктивных соображений такие неотражающие поглотители выполняются обычно нанесенными на металлическую подложку, что не всегда допустимо, например, в случае возможного оптического обнаружения укрываемого объекта или при решении важной экологической задачи для защиты населения от вредного воздействия проникающего микроволнового излучения на биоткани. Получаемые покрытия оказываются механически

непрочными, тяжелыми, обладают недостаточно высокой термостойкостью и требуют сложной технологии их изготовления. Кроме того, проводимые ранее исследования ограничивались в основном анализом возникновения условий полного поглощения волны при ее нормальном падении на слоистые системы, а также на системы, не содержащие в своем составе поглощающие магнитные материалы. Вместе с тем, неотражающие микроволновые покрытия могут быть выполнены по доступной технологии с использованием слоистых диэлектриков и магнетиков. Таким образом, предпочтительнее становятся слоистые поглощающие покрытия, наносимые на непоглощающие подложки. Возможность использования поглощающего покрытия из диэлектрика было уже рассмотрено нами в предыдущих работах. Было бы желательным, для сравнения, применение в качестве вещества покрытия использование магнитных материалов, наносимых на диэлектрическую подложку.

В этой связи работа, связанная с исследованием явления полного поглощения волны при ее нормальном или угловом прохождении слоистых сред, содержащих в том числе поглощающие магнитные материалы, а также применения этого явления для: повышения чувствительности и точности приемников микроволнового, инфракрасного и оптического диапазонов волн; создания точных микроволновых методов измерения диэлектрических и магнитных свойств жидких и твердых веществ; методов выделения поляризационных составляющих падающего излучения, при разработке поляроидов; создания защитных антирадарных неотражающих покрытий, обеспечивающих укрытие объектов от их светового обнаружения; радарного контроля линейной скорости движения слабоотражающего тела и индикации неотражающих летящих объектов в технике является актуальной.

Диссертация выполнялась в соответствии с тематическими планами Института Физики НАНА 2002-2009 гг. и Азербайджанского Технического Университета 2009-2021 гг.

Целью работы являлось разработка научных принципов и практических рекомендаций при создании слоистых поглотителей, содержащих в своих составах поглощающие магнитные материалы и неотражающих падающее на них нормально или под углом электромагнитное излучение и применение этого явления для повышения чувствительности тепловых датчиков микроволнового, инфракрасного и оптического диапазонов волн, индикации неотражающих летящих объектов, защитных антирадарных неотражающих покрытий, контроля скорости движущего объекта, усиления аккумуляции солнечной энергии, точности измерений диэлектрических и магнитных свойств веществ в микроволновом и инфракрасном диапазонах волн,

Для достижения поставленной цели было необходимо решить следующие задачи:

- исследовать условия возникновения полного поглощения электромагнитного излучения в слое поглощающего магнитного вещества, нанесенного на металлическую и непоглощающую диэлектрическую подложку;
- исследовать условия возникновения полного поглощения электромагнитного излучения при его падении под углом на просветленную поглощающую подложку и поглощающие слои диэлектрика и магнетика, нанесенных на металлическую и непоглощающую диэлектрическую подложку;
- исследовать условия просветления поглощающей подложки при падении на нее под углом параллельно-поляризованной волны;
- исследовать условия просветления поглощающей подложки при падении на нее под углом поперечно-поляризованной волны;
- разработать микроволновые методы измерения диэлектрических и магнитных свойств сильнопоглощающих жидкостей с использованием трансформатора сопротивлений с регулируемым коэффициентом трансформации.
- провести оценку частоты модуляции при зондировании летящего слабоотражающего объекта.

- исследование возможности расширения диапазона применимости микроволнового метода измерения влагосодержания в нефтепродуктах.

Научной новизной работы является:

- Впервые разработаны программные обеспечения микроволновых методов измерения диэлектрических и магнитных свойств жидких и твердых веществ на основе компьютерных программ MathCad 15, MATLAB 9.1, Mathematica 11.1, Microsoft Excel 2016.
- Впервые разработаны алгоритмы и программные модули для вычисления диэлектрических и магнитных параметров сильнопоглощающих веществ с использованием в цепи измерения четвертьволновой пластины, согласующей жидкости, постоянного или переменного трансформатора сопротивлений.
- Впервые разработаны алгоритмы и программные модули для нахождения условий полного прохождения электромагнитной волны через слоистую структуру, состоящую из периодически чередующихся поглощающих слоев диэлектрика и магнетика и непоглощающих слоев диэлектрика, позволяющие практически полностью погасить излучение, при создании антирадарных неотражающих покрытий, обеспечивающие укрытие объектов от их светового обнаружения.
- Впервые получены расчетные уравнения при расшифровке сигналов, получаемых при дистанционном локационном зондировании наблюдаемых объектов.
- Впервые получены системы уравнений, определяющие значения оптических параметров веществ слоистой системы и толщины слоев просветляющих покрытий, при которых выполняются условия полного поглощения волны заданной частоты.
- Впервые составлены системы уравнений описывающие условия полного поглощения волны в поглощающей подложке с регулируемым по толщине слоем непоглощающего покрытия и четвертьволновыми непоглощающими слоями;

- Впервые составлены системы уравнений описывающие условия полного поглощения волн при их падении под углом на просветленную поглощающую подложку и поглощающие слои диэлектрика и магнетика, нанесенных на металлическую и непоглощающую диэлектрические подложки;
- Впервые разработаны математические и алгоритмические методы обеспечения диэлектрических и магнитных свойств жидких материалов, основанных на анализе информационных параметров отраженного от вещества излучения.
- Впервые разработан способ контроля линейной скорости слабоотражающего тела и проведена оценка частоты модуляции при зондировании летящего слабоотражающего тела локационными сигналами известной частоты.
- Разработан метод расчета дипольного момента и времени релаксации неполярных жидкостей.
- Разработан способ определения малого содержания полярных веществ в неполярной среде.

Основные положения, выносимые на защиту:

- Условия полного прохождения электромагнитного излучения через системы, содержащие периодически чередующие слои из поглощающих диэлектрических или магнитных материалов и непоглощающих слоев диэлектрика. Оптимальное количество сдвоенных слоев (бислоев) обеспечивающих полное гашение проходящего через такую систему излучения.
- Явление полного поглощения электромагнитного излучения при ее нормальном или угловом прохождении слоистых сред, содержащих в том числе слои из поглощающих магнитных материалов, для повышения чувствительности и точности приемников микроволнового, инфракрасного и оптического диапазонов волн, для усиления аккумуляции солнечной энергии, методов выделения поляризационных составляющих падающего излучения.
- Зависимости коэффициента отражения волны от толщины слоя жидкого поглощающего диэлектрика и магнетика в свободном пространстве и в волноводе. Установление

функциональных связей между положением и величиной экстремумов этих зависимостей и значениями диэлектрических и магнитных свойств исследуемых веществ.

- Программные обеспечения микроволновых методов измерения диэлектрических и магнитных свойств веществ с использованием эффекта полного поглощения электромагнитного излучения в слое вещества. Разработка математических и алгоритмических методов измерения диэлектрических и магнитных свойств жидких и твердых веществ, основанных на анализе информационных параметров отраженного от вещества излучения.
- Системы уравнений, определяющие значения оптических параметров веществ слоистой системы и толщины слоев просветляющих покрытий, при которых выполняются условия полного поглощения волны заданной частоты.
- Способ радарного контроля линейной скорости движения слабоотражающего тела и определение частоты модуляции при зондировании летящего слабоотражающего тела локационными сигналами известной частоты.
- Условия частотной полосы просветления тепловых детекторов микроволнового и инфракрасного диапазонов волн при помощи последовательно нанесенных на подложку двух непоглощающих просветляющих покрытий: основного с регулируемой толщиной и четвертьволнового дополнительного покрытия.
- Анализ характеристик отражения электромагнитной волны от плоского слоя поглощающего магнетика, нанесенного на идеальную металлическую подложку. Установление существования у этих зависимостей нормальной и аномальной областей. Условия полного поглощения электромагнитного излучения в плоской системе магнетик-металл.
- Характеристики отражения электромагнитной волны от плоского слоя поглощающего магнетика, нанесенного на непоглощающий полубесконечный слой диэлектрика. Условия и частотная полоса полного поглощения электро-

магнитного излучения в плоской системе поглощающий магнетик-диэлектрик. Условия для выделения нужной поляризационной составляющей падающего излучения.

- Микроволновые методы измерения диэлектрических свойств жидких и твердых веществ с применением в цепи измерения постоянного или переменного трансформатора сопротивлений.
- Аналитические уравнения, которые описывают условия полного прохождения электромагнитных волн через слоистую структуру, состоящую из периодически чередующихся поглощающих слоев диэлектрика или магнетика и непоглощающих слоев диэлектрика.
- Расчетные уравнения для условий и полосы просветления как поглощающих, так и непоглощающих подложек, анализ их поведения в зависимости от толщины и свойств покрытия и подложки.

Объектом исследования работы являлись слоистые поглощающие покрытия состоящие из периодически чередующихся поглощающих слоев диэлектрика и магнетика, непоглощающих слоев диэлектрика, для повышения чувствительности тепловых приемников микроволнового, инфракрасного и оптического диапазонов волн, способа радарного контроля линейной скорости движения слабоотражающего тела и определение частоты модуляции при зондировании летящего слабоотражающего тела локационными сигналами известной частоты.

В качестве веществ просветляющего покрытия применено вещество с $n_1=1.5$: ацетон, циклогексанон, хлорбензол, фенол, метанол, пропанол, этанол, бутанол, циклогексанон, этилпиридин. В качестве двойного просветления поглощающей подложки рассмотрена задача просветления фотоприемника с подложкой кремния, и с покрытием – диоксид кремния и оксида титана, с коэффициентом преломления диоксида кремния равного 1.46.

Практическая значимость.

Рассмотрена возможность практического применения найденного явления в экологии, при аккумуляции солнечной энергии путем создания неотражающих и просветляющих покрытий, а также для повышения чувствительности приемников микроволнового, инфракрасного, оптического излучения и при разработке различных микроволновых методов количественного и качественного анализа свойств веществ, в том числе и методов его анализа путем дистанционного зондирования. Использование слоистых систем, содержащих периодически чередующиеся слои из поглощающих и непоглощающих материалов позволяют создавать антирадарные неотражающие покрытия, обеспечивающие укрытие объектов от их светового обнаружения. Предложенный способ измерения линейной скорости движущего тела может быть использован для радарного контроля скорости слабоотражающих объектов.

Проведенные исследования позволяют сделать вывод о возможности использования эффекта полного поглощения волны при разработке простых поляроидов для выделения нужной поляризационной составляющей падающих волн. Разработанные методы измерения диэлектрических свойств веществ могут быть использованы при исследованиях молекулярного строения слабопоглощающих растворов и жидкостей, для создания простого метода контроля малого содержания полярного вещества в неполярном растворителе, который может оказаться востребованным в нефтехимической промышленности в решении важной задачи оперативного нахождения содержания влаги в маслах и в нефтепродуктах.

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на:

- X международном научно-практическом семинаре “Практика и перспективы партнерства в сфере высшей школы” (Донецк, Украина. 4-7 мая 2009 года);

- International Conference on Communications, Control and Information Technology. World Academy Of Science, Engineering And Technology (Paris, France. August 24-26. 2011);
- International Conference on “Computer, Electrical, and Systems Sciences, and Engineering” World Academy Of Science, Engineering And Technology (Venice, Italy, november 28-30, 2011);
- International Congress And Exhibition “Natural Cataclysms And Global Problems Of The Modern Civilization” (Istanbul, Turkey, september 19-21, 2011);
- XIX Менделеевском съезде по общей и прикладной химии (Волгоград, Россия. 25-30 сентября 2011 года);
- International Scientific And Technical Conference “Prospects Of Development Of Modern Information And Communication Technologies” (Baku, Azerbaijan, september 22-24, 2011);
- International Academic Conference on Engineering, Internet and Technology (Prague, Czech Republic, december 12-13, 2014).

Публикации.

По материалам докторской диссертации опубликовано 58 статей, 20 одиночных статей, 30 статей опубликовано в индексируемых международных журналах (*Thomson Reuters, Web of Science, Scopus, Impact Factor, IEE, JCR, RSCI, Springer, JCR, RSCI, CAS, INSPEC, ADS, EBSCO, SJR, CSA, OCLC*) (США, Чехия, Россия, Украина, Беларусь), 7 международных конференций (Италия, Франция, Чехия, Турция, Россия), 1 Евразийский патент на изобретение, 1 монография.

Содержание работы. Диссертация состоит из введения, 6 глав, основных результатов и выводов, списка цитированной литературы. Она изложена на 286 страницах машинописного текста и содержит 52 рисунка, 8 таблиц и библиографию из 206 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении дано обоснование актуальности работы, сформулированы цель и задачи исследований, а также изложены основные результаты, имеющие научную новизну и практическую значимость.

В первой главе рассмотрены условия возникновения полного поглощения электромагнитного излучения в плоской слоистой системе, которая состоит из основного слоя поглощающего¹ вещества и нанесенных на него ряд слоев из непоглощающих веществ, согласующих входное сопротивление основного слоя с волновым сопротивлением свободного пространства, при котором падающее излучение пройдет без отражения просветляющие слои и полностью поглотиться в материале поглощающей подложки.

Рассмотрена задача отражения плоскополяризованной волны, падающей нормально на поглощающую подложку с нанесенными на нее основных и дополнительных просветляющих покрытий с соответствующими величинами коэффициентов преломления n_1 , n_2 и толщины слоев l_1 , l_2 . При этом будем считать, что вещество подложки имеет коэффициенты преломления n и поглощения χ , а толщина ее слоя выбрана бесконечной по величине. На рис.1 представлены зависимости между избирательными значениями оптических параметров подложки n , χ и дополнительного покрытия n_2 и отклонения Δ от величины кратной 0.5 длины волны в веществе основного покрытия. В качестве вещества основного просветляющего слоя выбрано вещество с $n_1 = 1.5$.

Для определения полосы просветления воспользуемся уравнением:

$$\Delta\lambda = \frac{4\rho_z}{\sqrt{(E')_0^2 + (F')_0^2}} ; \quad (1)$$

¹Yuping Duan. Microwave Absorbing Materials. USA. 2016, 402 pp.

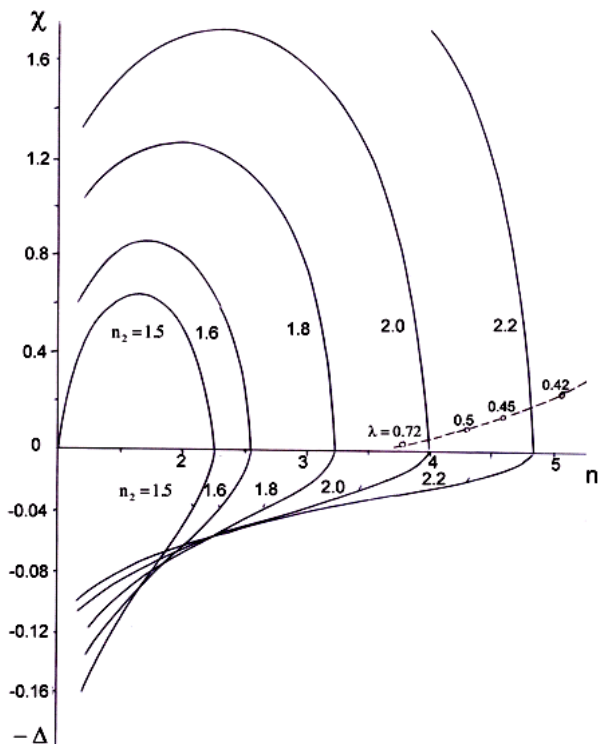


Рис.1. Зависимости между избирательными значениями коэффициентов преломления n и поглощения χ волны поглощающей подложки и отклонения Δ от величины кратной 0.5 длины волны для основного просветляющего покрытия. Коэффициенты преломления волны соответственно основного $n_1=1.5$ и дополнительного просветляющего покрытия n_2 . Длина волны λ падающего излучения, мкм. Штриховая кривая – зависимость χ от n кремния в области его дисперсии.

где: ρ_r – выбранная величина модуля коэффициента отражения волны рассматриваемой системы на краях полосы просветления вблизи $\rho=0$, E'_0, F'_0 – производные вещественной и мнимой составляющих входного сопротивления системы при $\rho = 0$

$$E'_0 = 0 ; F'_0 = \frac{(n_2^4 - n_1^2)(2\pi + 4\pi\Delta) + \pi n_1 n_2 (n_2^2 - 1)}{2\lambda_0 n_1 n_2^2} ; \quad (2)$$

$$\frac{\Delta\lambda}{\rho_e \lambda_0} = \frac{8n_1 n_2^2}{\pi [(n_2^4 - n_1^2)(2 + 4\Delta) + n_1 n_2 (n_2^2 - 1)]} . \quad (3)$$

В качестве примера использования двойного просветления поглощающей подложки рассмотрена задача просветления фотоприемника, в котором подложкой является кремний, а покрытием – диоксид кремния. В оптическом диапазоне волн коэффициент преломления диоксида кремния равен 1.46, а зависимость χ от n определяется кривой, приведенной на рис.1 в координатной плоскости $[n, \chi]$. При таком соотношении оптических параметров подложки и покрытия невозможно обеспечить условия полного гашения оптического излучения изменением толщины слоя покрытия. Однако, просветление достижимо, если наряду с основным покрытием (диоксид кремния) использовать второе, дополнительное и четверть-волновое просветляющее покрытие, вещество которого имело бы коэффициент преломления по величине, лежащей между коэффициентами преломления подложки и основного покрытия. В качестве такого дополнительного покрытия могло бы быть применено четвертьволновое покрытие из оксида титана.

Во второй главе рассматриваются условия полного поглощения волны при ее падении под углом на просветленную поглощающую подложку.

При данном типе поляризации падающей волны комплексное выражение коэффициента отражения волны $\hat{\rho}$ для рассматриваемой плоской двухслойной системы равно:

$$\hat{\rho} = \frac{Z_d \cos \alpha_0 - Z_0 \cos \alpha_1}{Z_d \cos \alpha_0 + Z_0 \cos \alpha_1}; \quad (4)$$

где: Z_0 – волновое сопротивление вакуума; $\cos \alpha_0 = \sqrt{1-p}$; $\cos \alpha_1 = \sqrt{1-p/\epsilon_1}$; $p = \sin^2 \alpha_0$; α_1 – угол преломления волны в материале покрытия; ϵ_1 – диэлектрическая проницаемость вещества покрытия.

Входящее в уравнение (4) входное сопротивление Z_d системы покрытие-подложка определяется выражением:

$$Z_d = Z_1 \frac{Z \cos \alpha_1 + Z_1 \cos \alpha_2 \operatorname{th}(\gamma l \cos \alpha_1)}{Z_1 \cos \alpha_2 + Z \cos \alpha_1 \operatorname{th}(\gamma l \cos \alpha_1)} \quad (5)$$

где: Z_1, Z – волновые сопротивления материалов покрытия и подложки; $\cos \alpha_2 = \sqrt{1-p/\epsilon}$; $\gamma = i2\pi\sqrt{\epsilon_1}/\lambda$ – постоянная распространения волны в материале покрытия; α_2 – угол преломления волны в веществе подложки; ϵ_1 и l – диэлектрическая проницаемость и толщина слоя покрытия; λ – длина волны падающего излучения.

$$\bar{\chi} = \sqrt{(\bar{n} - 1)(\bar{n}_1^2 - \bar{n})}; \quad (6)$$

$$\operatorname{tg} 4\pi x = \frac{2\bar{\chi}\bar{n}_1}{\bar{n}_1^2 - \bar{n}^2 - \bar{\chi}^2}. \quad (7)$$

$$x = \frac{2N_0 - 1}{4} + \Delta; \quad (8)$$

$$\Delta = \frac{1}{4\pi} \operatorname{arctg} \frac{2\bar{\chi}\bar{n}_1}{\bar{n}_1^2 - \bar{n}^2 - \bar{\chi}^2}. \quad (9)$$

$$\frac{l_0}{\lambda} = \frac{1}{\bar{n}_1 \sqrt{1-p}} \left[\frac{(2N_0 - 1)}{4} + \frac{1}{4\pi} \operatorname{arctg} \frac{2\bar{\chi}\bar{n}_1}{\bar{n}_1^2 - \bar{n}^2 - \bar{\chi}^2} \right] \quad (10)$$

На рис.2 и 3 даны семейства зависимостей χ и Δ от n при $n_1=1.5$ и различных значениях угла падения волны.

Характерно, что величина отклонения Δ толщины просветляющего слоя от $\bar{\lambda}_{1d}/4$, отрицательна во всем интервале изменения n и α_0 . При $\chi = 0$ она равна нулю, с уменьшением n возрастает по абсолютной величине и достигает своего предельного значения 0.25 (см.рис.2).

В таблице 1 приведены результаты расчета избирательных значений λ_0 , l_0 при $N_0 = 1, 2$ и 3 двухслойных систем, в которых в качестве вещества подложки использованы ряд полярных жидкостей с известными значениями ϵ_0 , ϵ_∞ и τ . В качестве вещества просветляющего покрытия применено вещество со значением $n_1 = 1.5$. Полученные результаты позволяют высказать предположение о возможностях экспериментального наблюдения полного поглощения электромагнитного излучения, падающего под углом на поглощающую подложку с нанесенным на нее просветляющего непоглощающего покрытия.

В таблице 2 приведены результаты расчета избирательных значений длины волны излучения λ_0 и первых трех толщин l_0 слоя покрытия поглощающей подложки, при которых выполняются условия полного поглощения падающего излучения в двухслойной системе.

В качестве вещества подложки использованы ряд полярных жидкостей с известными значениями ϵ_0 , ϵ_∞ и τ , а в качестве вещества просветляющего покрытия—вещество со значением $n_1 = 1.5$. Как следует из данных таблицы 2, в жидкости при определенном подборе толщины слоя покрытия полное поглощение параллельно-поляризованной волны возможно при ее падении как под углами просветления, так и под углами Брюстера. Выявленные условия существования полного прохождения параллельно-поляризованной волны под углом к просветленной поглощающей подложки позволяют осуществить целенаправленный поиск материалов при проектировании неотражающих элементов, в частности, тепловых приемников излучения.

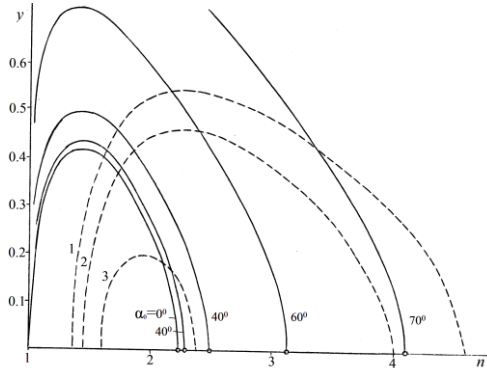


Рис.2. Зависимости между коэффициентом преломления n и фактором диэлектрических потерь y вещества поглощающей подложки бесконечной толщины: А) при полном поглощении падающей на нее под углом α_0 поперечно-поляризованной волны при наличии у подложки нанесенного на нее просветляющего слоя покрытия с коэффициентом преломления $n_1 = 1.5$; В) при дебаевском типе дисперсии волн y ацетона (1), циклогексанона (2) и хлорбензола (3) (пунктирные линии).

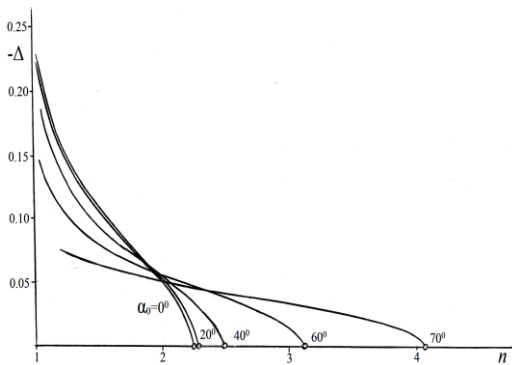


Рис.3. Величина отклонения Δ толщины слоя покрытия от величин кратных четверти длины волны в веществе покрытия в зависимости от коэффициента преломления n подложки и угла падения волны α_0 при выполнении условий полного поглощения излучения в двухслойной системе покрытие-подложка.

Таблица 1

Избирательные значения толщины l_0 слоя просветляющего покрытия и длины волны λ_0 падающего излучения ряда полярных жидкостей дебаевского типа при различных углах падения волны; ϵ_0 , ϵ_∞ , τ соответственно статическая и высокочастотная диэлектрические проницаемости и время релаксации жидкости. N_0 – номер нулевого минимума отраженного сигнала.

№	Жидкость	α_0 , град	λ_0 , см	$-\Delta$	l_0 , см		
					$N_0=1$	$N_0=2$	$N_0=3$
1	Ацетон $\epsilon_0 = 21.2$; $\epsilon_\infty = 1.90$; $\tau = 3.01 \cdot 10^{-12}$ с	0	0.058	0.099	0.007	0.025	0.046
		20	0.062	0.095	0.007	0.028	0.049
		40	0.077	0.082	0.010	0.038	0.067
		60	0.155	0.051	0.025	0.088	0.151
		70	0.468	0.046	0.091	0.291	0.492
2	Циклогексанон $\epsilon_0 = 16.0$; $\epsilon_\infty = 2.18$; $\tau = 10.3 \cdot 10^{-12}$ с	0	0.304	0.085	0.034	0.135	0.236
		20	0.322	0.082	0.037	0.148	0.258
		40	0.407	0.070	0.054	0.204	0.355
		60	0.869	0.042	0.148	0.502	0.857
3	Хлорбензол $\epsilon_0=5.74$; $\epsilon_\infty =2.55$; $\tau =7.0 \cdot 10^{-12}$ с	0	1.538	0.034	0.221	0.734	1.247
		20	1.949	0.028	0.297	0.964	1.631
4	Фенол $\epsilon_0 = 11.7$; $\epsilon_\infty = 3.19$; $\tau = 87.10^{-12}$ с	0	0.414	0.053	0.055	0.193	0.330
		20	0.447	0.051	0.061	0.214	0.367
		40	0.597	0.045	0.090	0.310	0.530
		60	1.692	0.023	0.314	1.005	1.696

Была рассмотрена возможность проявления этого эффекта при прохождении плоской поперечно-поляризованной волны через слой непоглощающего вещества в поглощающую подложку бесконечной толщины. Согласно проведенным исследованиям условия полного прохождения волны через подобную двух-слойную систему может возникнуть в точке минимума зависимости модуля коэффициента отражения волны ρ от толщины l просветляющего слоя покрытия и при выполнении условия $\rho = 0$ в этой точке.

Таблица 2

Избирательные значения толщины l_0 слоя просветляющего покрытия и длины волны λ_0 падающего излучения ряда полярных жидкостей дебаевского типа при различных углах падения волны; $\alpha_{пр}$, $\alpha_{бр}$ – соответственно углы просветления и Брюстера; ϵ_0 , ϵ_∞ , τ – соответственно статическая и высокочастотная диэлектрические проницаемости и время релаксации жидкости при температуре 20°C ; N_0 – номер нулевого минимума отраженной волны; Δ – величина отклонения l_0 от значений, кратных четверти длины волны в веществе покрытия.

№	Жидкость	$\alpha_{пр}$, град	$\alpha_{бр}$, град	λ_0 , см	– Δ	l_0 , см		
						$N_0=1$	$N_0=2$	$N_0=3$
1	Ацетон $\epsilon_0 = 21.2$; $\epsilon_\infty = 1.90$; $\tau = 3.01 \cdot 10^{-12}\text{с}$	0		0.059	0.099	0.006	0.025	0.045
		20		0.055	0.104	0.006	0.024	0.043
		40		0.039	0.126	0.004	0.018	0.033
		50		0.020	0.161	0.001	0.009	0.017
			60	0.018	0.166	0.005	0.012	0.020
			65	0.053	0.139	0.016	0.038	0.061
			70	0.116	0.098	0.040	0.089	0.139
2	4–этилпиридин $\epsilon_0 = 11.0$; $\epsilon_\infty = 2.52$; $\tau = 22 \cdot 10^{-12}\text{с}$	0		1.133	0.068	0.138	0.516	0.893
		20		1.057	0.071	0.130	0.492	0.853
		40		0.731	0.082	0.090	0.360	0.630
		50		0.367	0.087	0.046	0.189	0.331
			60	0.325	0.090	0.109	0.241	0.374
			65	0.998	0.091	0.341	0.759	1.176
			70	2.554	0.058	0.965	2.057	3.149
3	Хлорбензол $\epsilon_0 = 5.74$; $\epsilon_\infty = 2.55$; $\tau = 7.0 \cdot 10^{-12}\text{с}$	0		1.538	0.034	0.221	0.734	1.247
		20		1.281	0.040	0.184	0.623	1.061
		40		0.683	0.061	0.095	0.347	0.599
		50		0.299	0.074	0.041	0.157	0.273
			60	0.261	0.078	0.090	0.197	0.304
			65	1.085	0.056	0.403	0.857	1.311

Были найдены условия полного прохождения параллельно-поляризованной (ПАП) волны под углом к плоской двухслойной системе, состоящей из поглощающей подложки с нанесенным на нее непоглощающего покрытия. Условия полного прохождения ПАП волны через двухслойную систему возникают в точке минимума зависимости модуля коэффициента отражения волны ρ от толщины l просветляющего слоя покрытия и при выполнении условия $\rho=0$ в этой точке. Связь между избирательными значениями коэффициентов преломления n и поглощения χ подложки, длины волны падающего излучения λ_0 , толщины l_0 слоя и коэффициента преломления n_1 просветляющего покрытия описываются следующими уравнениями:

$$Y = \frac{1}{N} \sqrt{(\bar{n}_1 N / n_1^2 - 1)(1 - n_1^2 N / \bar{n}_1)} \quad (11)$$

$$x = \frac{l_0}{\lambda_{1d}} = \frac{2N_o - 1}{4} + \Delta \quad ; \quad \text{при углах просветления} \quad (12)$$

$$x = \frac{l_0}{\lambda_{1d}} = \frac{N_o}{2} + \Delta \quad ; \quad \text{при углах Брюстера} \quad (13)$$

На рис.4 в качестве примера даны вычисленные по этим уравнениям зависимости ε'' от ε' при $\varepsilon_1 = 2.25$ и $N_0 = 1$ соответственно для просветляющих углов падения волны (сплошные линии) и для углов Брюстера (пунктирные линии).

$$\varepsilon'_{np} = \frac{1 + \sqrt{1 - 4ap}}{2a} \quad ; \quad (14)$$

В таблице 3 приведены вычисленные на основе уравнений (11) –(14) избирательные значения углов падения волны и толщин слоя покрытия, при которых в рассматриваемой

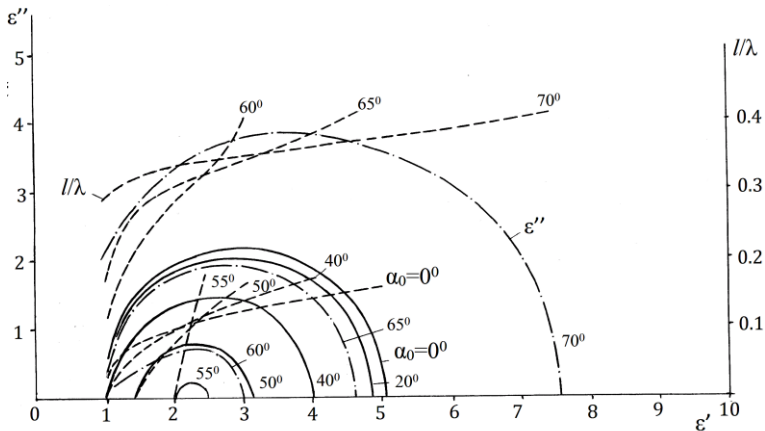


Рис.4. Зависимости между толщиной l_0 слоя покрытия, диэлектрической проницаемостью ϵ' и диэлектрическими потерями ϵ'' вещества поглощающей подложки бесконечной толщины при полном поглощении падающей под углом α_0 параллельно-поляризованной волны на систему покрытие-подложка.

двухслойной системе создаются условия для полного поглощения падающего на нее электромагнитного излучения.

В качестве материала покрытия в системе использовался диэлектрик со значением $\epsilon_1=2.25$, а в качестве материала подложки – различные полярные жидкости, обладающие дисперсией в диапазоне микроволн. При указанных в таблице 3 значениях ϵ'_0 , ϵ''_0 жидкостей, измеренных в диапазоне микроволн, полное поглощение волн в этих жидкостях возможно ожидать в интервале величин α_0 и l_0 соответственно $30-70^\circ$ и $0.4-4$ см. Определялись зависимости модуля коэффициента отражения волн ρ подобных систем от угла падения волны α_0 в интервале $(0,90^\circ)$ и при толщинах слоя покрытия близкими или равными избирательным величинам, определенных соответственно по уравнениям (12) и (13).

Таблица 3

Расчетные значения углов падения волны α_0 и толщины l_0 слоя покрытия просветленной поглощающей подложки, при которых возникают условия для полного поглощения в ней падающего излучения; ε'_0 и ε''_0 – экспериментальные значения диэлектрической проницаемости и диэлектрических потерь жидкостей при температуре 20⁰С.

№	Жидкость	$\lambda_0, \text{см}$	ε'_0	ε''_0	Для просветляющих углов			Для углов Брюстера $\alpha_{бр}$				
					$\alpha_0,$ град	Толщина слоя $l_0, \text{см}$			$\alpha_0,$ град	Толщина слоя $l_0, \text{см}$		
						$N_0=1$	$N_0=2$	$N_0=3$		$N_0=1$	$N_0=2$	$N_0=3$
1	Метанол	0.818	5.35	3.20	–	–	–	–	69.7	0.316	0.665	1.015
2	Этанол	3.20	3.85	1.05	36.3	0.497	1,658	2.819	64.0	1.221	2.554	3.886
3	Пропанол	3.22	3.53	1.16	38.8	0.480	1.661	2.843	63.6	1.197	2.532	3.873
4	Бутанол	3.22	3.14	0.75	46.7	0.492	1.720	2.947	61.8	1.188	2.514	3.841
5	2-этилпиридин	3.22	5.73	2.65	–	–	–	–	69.2	1.266	2.638	4.010
6	4-этилпиридин	3.22	5.76	3.95	–	–	–	–	70.7	1.250	2.631	4.012

Для нахождения этих зависимостей использовалось комплексное выражение для коэффициента отражения параллельно-поляризованной волны $\hat{\rho}$ рассматриваемой двухслойной системы (15).

На рис.5 представлены вычисленные по уравнению (15) зависимости от угла падения α_0 модуль коэффициента отражения волны ρ двухслойной системы, состоящей из покрытия с $\epsilon_1=2.25$ и этилового спирта в качестве вещества подложки.

$$\hat{\rho} = \frac{Z_0 \cos \alpha_0 - Z_d \cos \alpha_1}{Z_0 \cos \alpha_0 + Z_d \cos \alpha_1}; \quad (15)$$

Использовались данные измерения диэлектрических коэффициентов этилового спирта, полученных при длине волны $\lambda=3.2$ см. Расчеты проводились при значениях толщины слоя покрытия, равному или близкому к первому ($N_0=1$) его избирательному значению, найденному предварительно из условия полного поглощения в подложке падающего излучения.

Результаты этих расчетов указывают, что полное поглощение волны в данной жидкости ожидаемо при падении параллельно-поляризованной волны не только под просветляющим углом 36.3^0 и при первой, соответствующим ему возможной толщине слоя покрытия равному 0.50 см, но и под углом Брюстера 64.0^0 и соответствующему ему первой возможной толщине слоя покрытия равному 1.22 см. Аналогичный результат был получен и в случае использования в качестве вещества подложки пропилового спирта (см. рис. 6).

При $\lambda=3.22$ см и $N_0=1$ у такой двухслойной системы фиксируются две зависимости ρ от α_0 , обладающие нулевыми минимумами соответственно при $l_0=0.48$ см (просветляющий угол $\alpha_0=38.8^0$) и $l_0=1.20$ см (угол Брюстера $\alpha_0=63.6^0$). Однако, при использовании в качестве вещества подложки 2-этилпиридина при тех же значениях λ и N_0 подобная зависимость ρ от α_0 наблюдается только при угле Брюстера $\alpha_0 = 69.2^0$ и толщине слоя покрытия $l_0 = 1.26$ см.

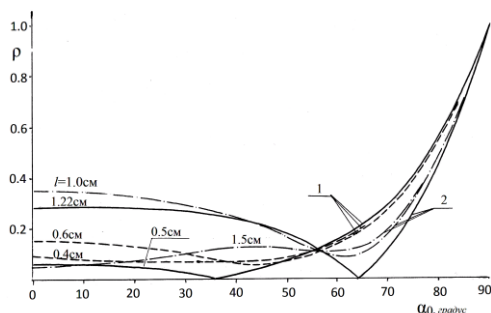


Рис.5. Зависимости модуля коэффициента отражения волны ρ от угла падения α_0 для поглощающей жидкости с просветляющим покрытием из вещества с значением диэлектрической проницаемости $\epsilon_1 = 2.25$ и при избирательных толщинах слоя покрытия: А. Соответствующим углам просветления (1) и Брюстера (2) (сплошные линии); В. Близкими к избирательным величинам, соответствующими угла просветления (штриховые линии) и Брюстера (штрихпунктирные линии). Поглощающая жидкость – этанол; длина волны излучения $\lambda = 3.2$ см.

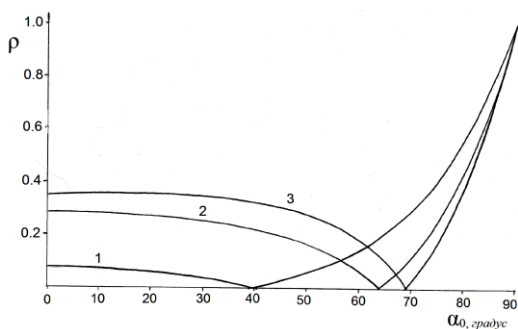


Рис.6. Зависимости модуля коэффициента отражения волны ρ от угла падения α_0 параллельно-поляризованной волны для пропанола (1, 2) и 2-этилпиридина (3) при толщинах просветляющего слоя покрытия, соответствующих: углу просветления (1) и углам Брюстера (2,3). Диэлектрическая проницаемость материала покрытия $\epsilon_1=2.25$; длина волны падающего излучения $\lambda = 3.2$ см.

Таким образом, проведенные исследования характера отражения электромагнитного излучения от поглощающего бесконечного слоя вещества с нанесенным на него слоя из непоглощающего диэлектрика, свидетельствует о возможности существования условий и экспериментального наблюдения явления полного поглощения излучения заданной частоты при строго определенных для используемых материалов толщины слоя покрытия и углах падения волны определенной поляризации.

Установлено, что в отличие от падения параллельно-поляризованной (ПАП) волны на такую систему полное поглощение поперечно-поляризованной (ПОП) волны возможно не только при просветляющем угле, но и при угле, аналоге угла Брюстера для прозрачных сред. Найдены условия для выделения нужной поляризационной составляющей падающего излучения.

В третьей главе проведен анализ характеристик отражения электромагнитной волны от плоского слоя поглощающего магнетика², нанесенного на идеальную металлическую подложку. Установлено существование у этих зависимостей нормальной и аномальной областей, отличающихся характером изменения их экстремальных величин с ростом толщины слоя. Найдены условия и частотная полоса полного поглощения электромагнитного излучения в плоской системе магнетик-металл. Исследованы их зависимости от избирательных значений магнитных свойств и толщины слоя магнетика.

На рис.7 показана зависимость ρ от x магнитного материала покрытия. Из этого следует, что условия существования нулевого минимума должны определять условия возникновения в веществе полного поглощения падающего на него электромагнитного излучения. Условие полного поглощения волны в веществе покрытия будет определяться равенством:

$$\operatorname{th}(2\pi xy + i2\pi x) = \frac{1}{n(1 - iy)} \quad (16)$$

² David Jiles. Introduction to magnetism and magnetic materials. 2015, 626 pp.

$$ih \frac{\alpha + i\beta}{2} = \frac{1}{n(1-iy)} . \quad (17)$$

$$4\pi xy = \ln(1/r) ; \quad 4\pi x = -\varphi . \quad (18)$$

$$x_m = \frac{N}{2} + \Delta_m ; \quad (19)$$

$$2\pi N - \varphi = \frac{1}{y} \ln\left(\frac{1}{r}\right) . \quad (20)$$

$$\Delta_m = -\frac{1}{4\pi} \operatorname{arctg} \frac{2ny}{1-n^2(1+y^2)} \quad (21)$$

$$\frac{l_0}{\lambda_0} = \frac{1}{2\pi n} \left[\pi N - \frac{1}{2} \operatorname{arctg} \frac{2ny}{1-n^2(1+y^2)} \right] \quad (22)$$

Это указывает на то, что полное поглощение электромагнитного излучения возможно даже в веществах покрытия, обладающих незначительными по величине магнитными потерями; в этих случаях эффект полного поглощения волны реализуется при повышенных значениях толщины отражающего слоя вещества покрытия.

Определены условия полного поглощения электромагнитного излучения при его падении под углом на плоскую двухслойную систему магнетик-металл. Установлено различие в падении параллельно-поляризованной (ПАП) и поперечно-поляризованной (ПОП) волны на такую систему, что позволяет выделять с ее помощью нужную поляризационную составляющую падающего излучения.

На рис. 8 даны семейства зависимостей y и Δ от n при различных значениях угла падения ПОП волны.

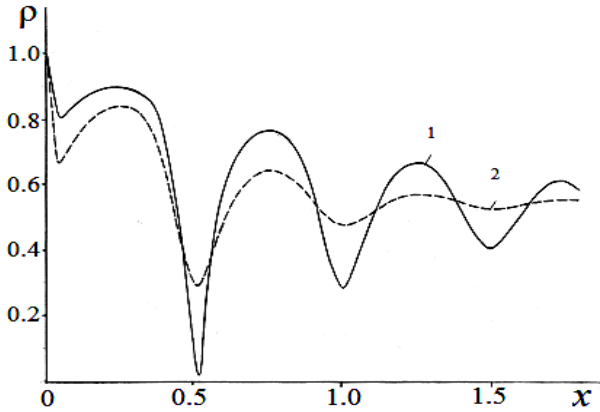


Рис.7. Зависимости модуля коэффициента отражения волны ρ от толщины $x = l/\lambda_m$ слоя жидкого магнетика при $\mu' = 10, \mu'' = 1$ (1) и $\mu' = 10, \mu'' = 2$ (2); λ_m – длина волны в магнетике.

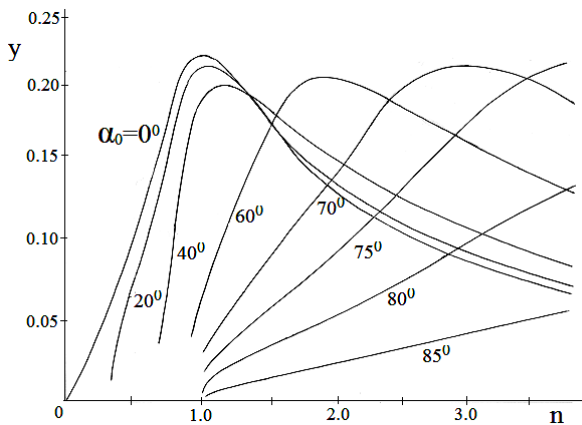


Рис.8. Зависимости фактора магнитных потерь y от коэффициента преломления волны n вещества поглощающего покрытия при полном гашении падающей на нее под углом α_0 ПОП волны.

В четвертой главе анализируются характеристики отражения электромагнитной волны от плоского слоя поглощающего магнетика, нанесенного на непоглощающий полубесконечный слой диэлектрика. Определяются границы существования у этих зависимостей нормальной и аномальной областей, отличающихся характером изменения их экстремальных величин с ростом толщины слоя. Исследуются условия и частотная полоса полного поглощения электромагнитного излучения в плоской системе поглощающий магнетик-диэлектрик в зависимости от избирательных значений диэлектрической проницаемости подложки, магнитных свойств и толщины слоя магнитного покрытия.

Было установлено, что при нормальном падении волны на двухслойные системы магнетик-металл и магнетик-непоглощающий диэлектрик ее полное поглощение возникает при толщине слоя покрытия по величине, близкой к длине волны в веществе покрытия. Подобное сохраняется и при падении волны под углом на двухслойную систему магнетик-диэлектрик, но при толщине слоя покрытия по величине, близкой к $1/2$ длины волны в веществе покрытия по направлению распространения в нем волны.

В таблице 4 приведены вычисленные на основе полученных уравнений избирательные значения углов падения волны и толщин слоя покрытия, при которых в рассматриваемой двухслойной системе создаются условия для полного прохождения ПАП волны при углах ее падения $\alpha_0 > \alpha_B$. В качестве материала покрытия в системе использовались различные полярные жидкости, обладающие дисперсией в диапазоне микроволн, а в качестве материала подложки—диэлектрик со значением $\epsilon_1 = 2.25$.

На рис.9. в качестве примера приведены зависимости ϵ'' от ϵ' и l/λ от ϵ' при $\epsilon_1 = 2.25$ и $N = 1$ соответственно для случаев падения на систему поперечно- и параллельно-поляризованных волн. Характер их поведения от угла падения волны зависит от типа ее поляризации.

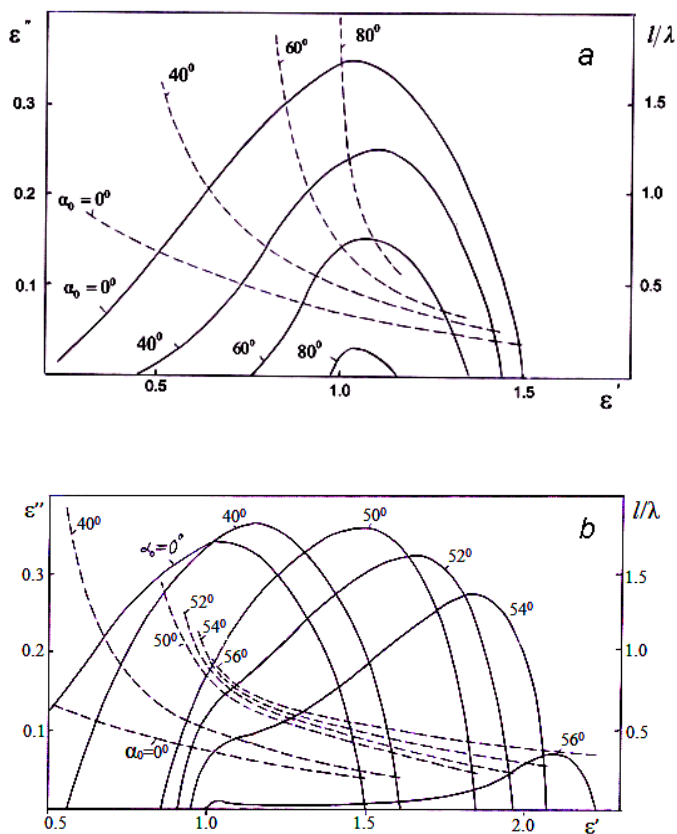


Рис.9. Зависимости диэлектрических потерь ϵ'' (сплошные кривые) и толщины слоя l_0/λ (штриховые) от диэлектрической проницаемости ϵ' вещества поглощающего покрытия при полном гашении падающей на нее под углом α_0 ПОП волны (a) и ПАП волны (b). Диэлектрическая проницаемость вещества подложки $\epsilon_1 = 2.25$.

Таблица 4

Расчетные значения избирательных значений угла падения ПАП волны α_0 и толщины l слоя полярной жидкости, нанесенной на непоглощающей подложки с $\varepsilon_1 = 2.25$. Температура жидкости 20°C , $\alpha_0 > \alpha_B$, $N = 1$.

№	Жидкость	λ , см	ε'	ε''	α_0 , градус	l , см
1	Вода	3.21	62.42	31.57	78.9	0.112
2	Метанол	20	27.5	11.3	73.7	1.08
3	Ацетон	3.21	20.92	3.54	65.6	0.260

При указанных в таблице значениях ε' , ε'' жидкостей, измеренных в диапазоне микроволн, полное прохождение ПАП волны в этих жидкостях можно ожидать в интервале величин α_0 и l соответственно $30\text{--}70^{\circ}$ и $0.4\text{--}4$ см.

Проведенные теоретические исследования характера отражения электромагнитного излучения от поглощающего слоя вещества, нанесенного на бесконечный по толщине слой непоглощающей подложки, подтверждают существование условий и возможности экспериментального наблюдения явления полного прохождения излучения заданной частоты при строго избирательных значениях толщины слоя покрытия и угла падения волны определенной поляризации.

В пятой главе проведены исследования зависимостей коэффициента отражения волны от толщины слоя жидкого поглощающего диэлектрика и магнетика в свободном пространстве и в волноводе типа ТЕ. Определены функциональные связи между положением и величиной экстремумов этих зависимостей и значениями диэлектрических³ или магнитных свойств исследуемого вещества.

Они позволили разработать на их основе не имеющие аналогов точные микроволновые методы измерения

³ Carmine Vittoria. Magnetics, Dielectrics, and Wave Propagation with MATLAB®Codes. 2010, 427 pp.. London.

диэлектрических и магнитных свойств жидкостей и растворов с $tg\delta < 0.8$, в том числе с использованием эффекта полного поглощения электромагнитного излучения в слое вещества. Разработан ряд микроволновых методов измерения диэлектрических свойств жидких и твердых веществ с $tg\delta < 0.8$ с применением в цепи измерения трансформатора сопротивлений.

Их практическое применение позволяет получать достоверную информацию о диэлектрических и магнитных свойствах жидких объектов исследования, а на их основе об их молекулярном строении. В частности, анализ поведения частотных и температурных зависимостей диэлектрической проницаемости и диэлектрических потерь полярных жидкостей и их растворов позволяют определять значения дипольных моментов полярных молекул, поляризуемости, времен релаксации, энергии активации дипольной релаксации, характер ориентаций диполей и ряд других важных молекулярных характеристик вещества. Весьма перспективным является применение его к оценке влияния ближнего окружения на процессы релаксации дипольных молекул при анализе диэлектрических свойств концентрированных растворов, компоненты которых обладают различной молекулярной природой. Они позволяют определять возможность образования молекулярных ассоциатов и комплексов за счет действия меж- и внутримолекулярных водородных связей. В этой связи одним из относительно простых методов определения волнового сопротивления⁴ и связанных с ним величин диэлектрических коэффициентов вещества связан с введением в цепь измерения регулируемый по толщине плоский слой непоглощающей жидкости, расположенного на поверхности исследуемого вещества.

Измерения диэлектрической проницаемости ϵ' и диэлектрических потерь ϵ'' жидкости в диапазоне сверхвысоких частот проводится с применением аппаратуры с использованием

⁴ Касимова С.Р.. Методы измерения диэлектрических и магнитных свойств твердых и жидких веществ в диапазоне сверхвысоких частот // Монография. 2016. стр.175.

волноводных или коаксиальных направляющих систем.

Для снятия экспериментальной зависимости $\eta(l)$ и нахождения по ней искомых значений ε' и ε'' применяются стандартные панорамные измерители коэффициента стоячей волны по напряжению типа Р2-66, Р2-67 в сочетании с измерителем Я2Р-67

Схема измерения ε' и ε'' с использованием волноводной направляющей системы, в которой в качестве аналога переменного трансформатора сопротивлений используется регулируемая по своему положению плоская четвертьволновая непоглощающая диэлектрическая пластина приведена на рис.10. В качестве согласующей жидкости допустимо использование неполярных жидкостей, не обладающими поглощением, например, бензол, гексан и др.

При существовании поглощения волны в веществе зависимость модуля коэффициента отражения волны ρ от толщины l слоя покрытия представляет собой осциллирующую и затухающую кривую, которая с увеличением l асимптотически приближается к своему предельному значению ρ_∞ (рис.11 *a,b*). Проведенные исследования поведения функции $\rho(x)$ в зависимости от величины фактора диэлектрических потерь показали, что при его малых значениях функция $\rho(x)$ распадается на две области. Одна из них, располагаемая при повышенных толщинах отражающего слоя, имеет традиционно нормальный затухающий характер, при котором монотонный спад максимальных значений ρ с ростом номера экстремума сопровождается соответствующим ростом минимальных значений ρ до их полного совпадения при больших l с предельной величиной ρ_∞ . В отличие от нее, в остальной области функции $\rho(x)$, названной аномальной областью изменения ρ , наблюдается синхронный спад как максимальных, так и минимальных значений ρ (рис.11 *c*).

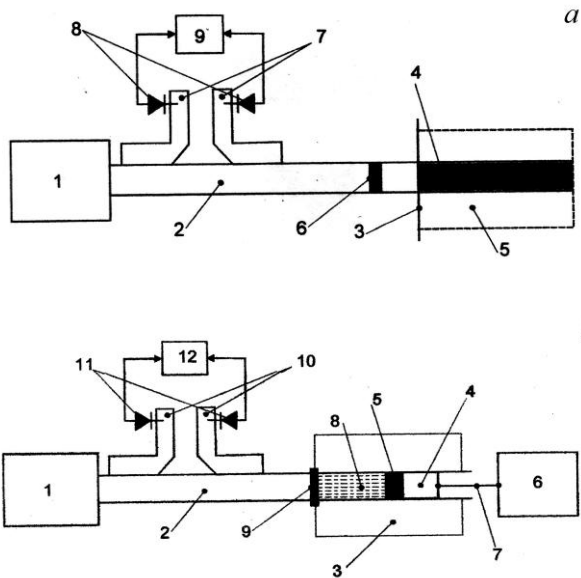


Рис.10. Блок-схемы измерения диэлектрических коэффициентов сильнопоглощающих твердых и жидких веществ с использованием панорамного измерителя коэффициента стоячей волны и применением четвертьволновой пластины (а) и согласующей жидкости (b). 1 – клистронный генератор с аттенюатором и волномером; 2 – направляющий тракт; 3 –направленный ответвитель; 4 – детектор; 5 – измеритель КСВ ; 6 – пластина; 7 – измерительная ячейка; 8 – термостат; 9 – измеряемое вещество; 10 – согласующая жидкость; 11 – поршень;12 – микрометрическое устройство.

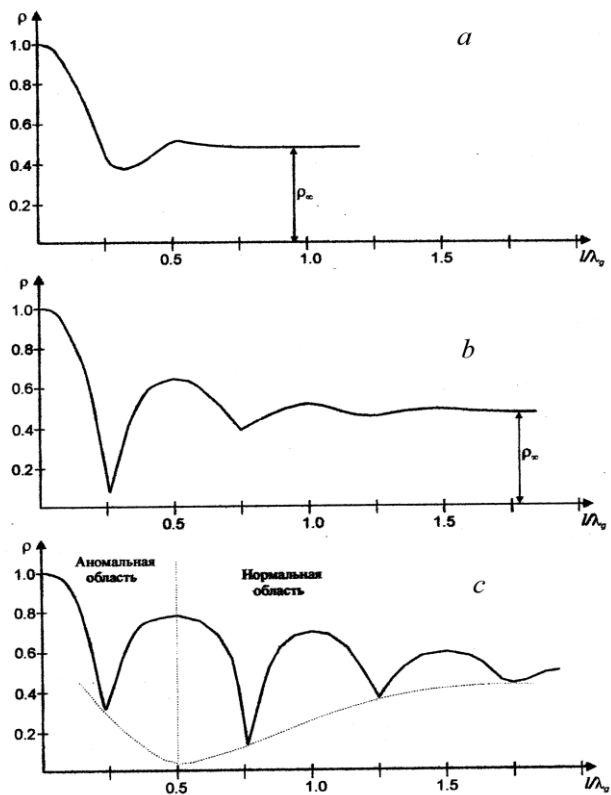


Рис.11. Зависимости модуля коэффициента отражения волны ρ от толщины слоя l вещества при значениях его фактора потерь γ равному 0.6 (*a*), 0.3 (*b*) и 0.1 (*c*). λ_d – длина волны в веществе.

Характерно, что с уменьшением затухания волны в веществе граница раздела нормальной и аномальной областей смещается в сторону высоких значений x . Из рассмотрения рис.9 вытекает возможность при определенном выборе диэлектрических свойств вещества покрытия достижения одного из минимумов функции $\rho(x)$ нулевого значения. Последнее свидетельствует о выполнимости условий полного поглощения падающего излучения в слое диэлектрика. Оно связано с появлением нулевых минимумов функции $\rho(x)$.

В шестой главе рассмотрены области применения разработанных методов и технических средств. Определены условия полного прохождения электромагнитного излучения через системы, содержащие периодически чередующие слои из поглощающих диэлектрических или магнитных материалов и не поглощающих слоев диэлектрика.

Найдено оптимальное количество сдвоенных слоев (бислоев), которое обеспечивает практически полное поглощение проходящего через такие системы излучения. Теоретически обоснована возможность и определены условия полного прохождения электромагнитного излучения через плоский слой поглощающего диэлектрика, нанесенного на четвертьволновую непоглощающую диэлектрическую подложку. Показано, что формируемые на основе такой двухслойной системы многослойные периодические структуры позволяют обеспечивать полноту поглощения проходящего через них электромагнитного излучения.

На рис.12 дана блок-схема алгоритма вычисления диэлектрических коэффициентов сильнопоглощающих веществ с использованием в цепи измерения четвертьволновой пластины.

Микроволновые поглотители электромагнитного излучения, как правило, формируются на основе наносимых на металлическую подложку плоского слоя диэлектрического покрытия или диэлектрических слоев, содержащих поглощающие высокодисперсные металлические или магнитные наполнители.

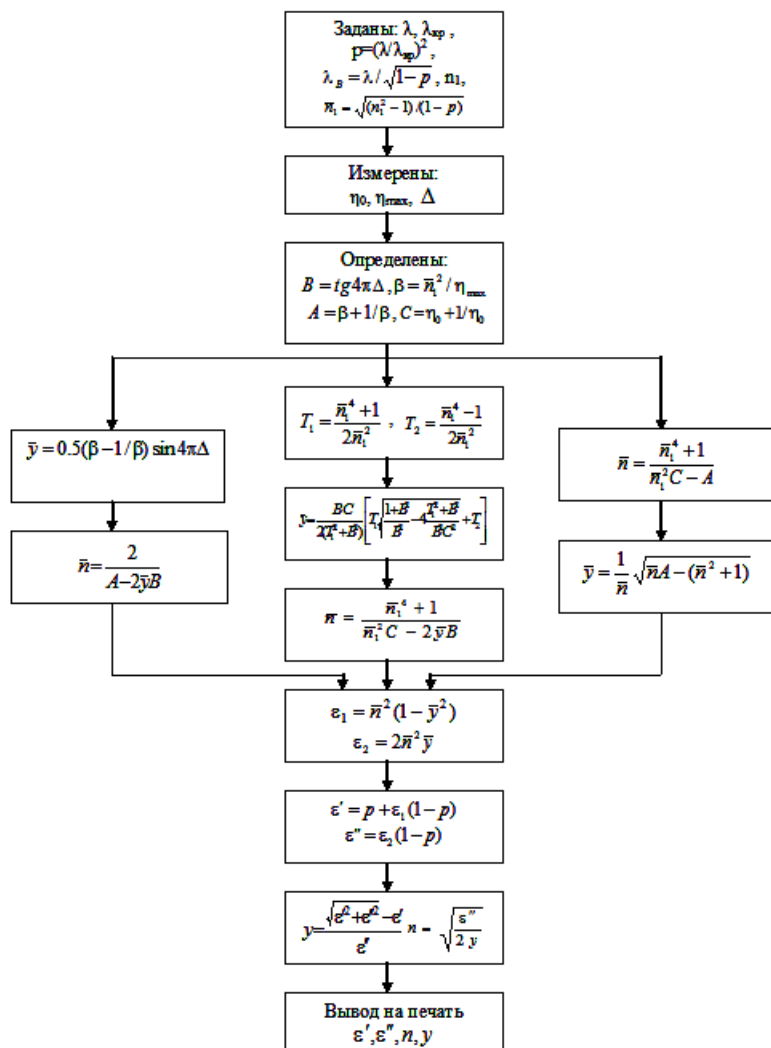


Рис.12. Блок-схема алгоритма вычисления диэлектрических коэффициентов сильнопоглощающего вещества с использованием в цепи измерения четвертьволновой пластины.

Вместе с тем использование в качестве несущей конструкции металлической подложки ограничивает применимость таких поглотителей, поскольку при их локационном зондировании создается возможность их светового обнаружения. В этой связи предпочтительными становятся периодические слоистые структуры, содержащие в своем составе чередующиеся поглощающие и непоглощающие слои и обеспечивающие полноту поглощения проходящего через них электромагнитного излучения. В качестве первого шага в решении этой задачи рассматривалась возможность получения двухслойных неотражающих поглотителей с использованием в качестве несущей подложки четвертьволнового по толщине l_1 слоя непоглощающего диэлектрика, а в качестве ее покрытия – слоя диэлектрика⁵ или магнетика толщиной l , поглощающего проходящее через него излучение. В последующем такая двухслойная система могла бы быть применена в качестве элемента многослойных поглощающих периодических структур.

В качестве безотражательной двухслойной системы можно использовать слой поглощающего магнетика, нанесенного на четвертьволновую непоглощающую диэлектрическую подложку. Из условия просветления такой непоглощающей системы (магнетиком, например, является диамагнитный материал) следует, что в реальной поглощающей системе условию полного поглощения волны реализуемы при рассмотрении обратной задачи, а именно, когда слой поглощающего магнетика нанесен на переднюю поверхность подложки.

Рассмотрен способ радарного контроля линейной скорости слабоотражающего тела⁶. Известны способы определения с помощью радара линейной скорости движущего тела, основанные на фиксации местоположения объекта наблюдения за различными измеряемыми отрезки времени.

⁵ Kasimova S.R.. Measurements of the dielectric properties of strongly absorbing substances at microwave frequencies // Measurement Techniques. USA, New-York. 2016. Vol.58, Is.12, p.1372-1375. (Thomson Reuters, Web Of Science, Scopus, Springer, JCR, RSCI, Impact Factor: 0.390)

⁶ Способ определения скорости движения тела // Евразийский Патент. №022902. 31.03.2016. G01S 13/58.

Однако, они не дают возможность определения скорости тела, которое движется на фоне механических помех, затрудняющих прохождению электромагнитного излучения. Для устранения этого недостатка широко используются методы определения скорости тела по величине разности частот направленного и отраженного сигнала электромагнитного излучения с использованием эффекта Доплера. Недостатком данных методов является зависимость указанного эффекта от отражательной способности объекта наблюдения, которая снижается, если объектом наблюдения является неметаллическое или слабоотражающее тело.

В этой связи расширение функциональных возможностей и обеспечение достоверности получаемой информации о скорости движущегося неметаллического или слабоотражающего объекта наблюдения. В предложенном методе определения скорости движения тела электромагнитным излучением радара зондируется объект наблюдения, при этом электромагнитное излучение предварительно проходит через плоскую непоглощающую четвертьволновую пластину, которую устанавливают вблизи антенны радара. Отраженное от объекта электромагнитное излучение поступает в приемное устройство антенны, где по частоте модуляции поступившего сигнала определяется пропорциональная ей скорости движения объекта. Рис.13 и 14 объяснят действие предложенного метода.

Известно, что комплексная величина коэффициента отражения плоскополяризованной волны, проходящей через плоскую четвертьволновую по толщине пластину из непоглощающего материала и затем отраженной от объекта наблюдения, определяется уравнением

$$\bar{\rho} = \frac{Z_{ex} - Z_0}{Z_{ex} + Z_0}; \quad (23)$$

где: $Z_{ex} = \frac{Z_1^2}{Z_0} \cdot \frac{Z_0 + Z_H \operatorname{th} \gamma l}{Z_H + Z_0 \operatorname{th} \gamma l}$ – входное сопротивление слоистой системы пластина–воздух–объект наблюдения;

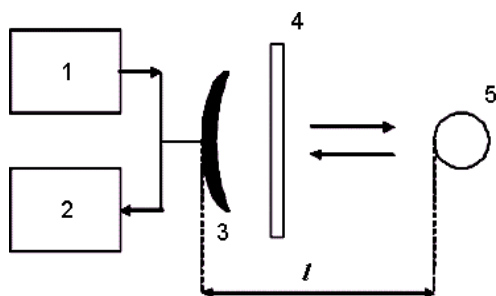


Рис.13. Блок-схема измерения скорости движения тела: 1– генератор СВЧ; 2 – приемник; 3 – антенна; 4 – четверть-волновая пластина из непоглощающего диэлектрика; 5 – объект наблюдения

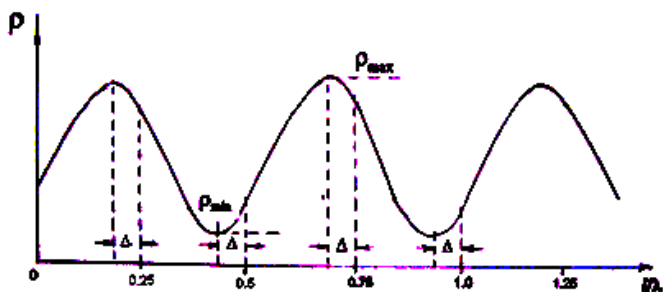


Рис.14. Зависимость модуля коэффициента отражения ρ электромагнитного излучения от расстояния l между источником и приемником излучения. Δ – отклонение максимумов ρ_{\max} и минимумов ρ_{\min} зависимости от величины кратной четверти длины волны λ .

$\gamma = i \frac{2\pi}{\lambda}$ – постоянная распространения волны в воздухе;

λ – длина волны падающего излучения; l – расстояние между антенной излучателя и объектом наблюдения (рис.13).

Здесь Z_0 , $Z_1 = Z_0 / n_1$, Z_n – соответственно волновые сопротивления вакуума, вещества пластины и объекта наблюдения, n_1 – коэффициент преломления вещества пластины.

Обозначим $x = l/\lambda$ и представим входное сопротивление рассматриваемой слоистой системы в виде $Z_{вх} = Z_0(E + iF)$. Тогда, модуль коэффициента отражения волны ρ рассматриваемой плоской системы будет равен:

$$\rho = \sqrt{\frac{(E-1)^2 + F^2}{(E+1)^2 + F^2}}. \quad (24)$$

Зависимость модуля коэффициента отражения волны ρ от расстояния l между источником излучения и объектом наблюдения представляет собой осциллирующую и незатухающую кривую, у которой ее экстремальные значения ρ лежат при значениях x_3 , равными:

$$x_3 = \frac{1}{4\pi} \operatorname{arctg} \frac{2ny}{1 - n^2(1 + y^2)}, \quad (25)$$

где: n и y – коэффициенты преломления и затухания волны вещества объекта наблюдения (см. рис.14).

Значения x_3 близки к величинам, кратным четверти длины волны λ проходящего излучения. Представим их в виде:

$$x_3 = \frac{l}{\lambda} = \frac{m}{4} - \Delta, \quad (26)$$

где: m – номер экстремума;

Δ – постоянная и малая величина, определяемыми оптическими свойствами объекта наблюдения.

Подставим выражение (26) в уравнение (25). Получим, что

$$\Delta = \frac{1}{4\pi} \operatorname{arctg} \frac{2ny}{n^2(1+y^2)-1} \quad (27)$$

Установлено, что в экстремумах функции $\rho(l)$ входное сопротивление Z_{BX} является вещественной величиной и равной $M_{\vartheta} Z_0$

$$\frac{Z_{BX}}{Z_0} = M_{\vartheta} = \frac{1}{n_1^2} \cdot \frac{n}{1 + yntg 2\pi x_0} \quad (28)$$

Учтем, что четным значениям m функции $\rho(l)$ соответствуют ее максимальные величины ρ_{\max} , а нечетным значениям m – ее минимальные величины ρ_{\min} . Тогда, в экстремальных точках функции $\rho(l)$ имеем:

$$M_{\vartheta} = \frac{1}{n_1^2} \cdot \frac{n}{1 + yn/tg 2\pi\Delta} \quad \text{в точках максимума } \rho, \quad (29)$$

$$M_{\vartheta} = \frac{1}{n_1^2} \cdot \frac{n}{1 - yntg 2\pi\Delta} \quad \text{в точках минимума } \rho.$$

После подстановки выражений (29) в уравнение (23) имеем, что коэффициенты стоячей волны $\eta = (1+\rho)/(1-\rho)$ в экстремумах функции $\rho(l)$ будут соответственно равны:

$$\eta_{\max} = \frac{1 + \rho_{\max}}{1 - \rho_{\max}} = \frac{1}{n_1^2} \cdot \frac{n}{1 + yn/tg 2\pi\Delta}, \quad (30)$$

$$\eta_{\min} = \frac{1 + \rho_{\min}}{1 - \rho_{\min}} = \frac{n}{n_1^2} \cdot \frac{1}{1 - yntg 2\pi\Delta}.$$

При движении объекта относительно источника электромагнитного излучения со скоростью v , отраженный от

него сигнал с частотой f , благодаря наличию на пути прохождения сигнала пластины, будет амплитудно-модулированным. При этом период модуляции τ будет равен отношению половины длины волны λ излучения к скорости движения объекта v . Следовательно, частота модуляции отраженного от объекта сигнала будет равна:

$$f_c = 2f \frac{v}{c}, \quad (31)$$

где: c – скорость света, см/сек; f – частота локационной станции, Гц.

Таким образом, сам факт появления амплитудной модуляции свидетельствует о существовании движущего объекта. При этом величина частоты модуляции сигнала дает информацию о скорости движения объекта наблюдения, а амплитуда модуляции определяется, согласно выражениям (30), соотношением между оптическими параметрами материалов пластины и объекта наблюдения.

Проведена оценка частоты модуляции при зондировании летящего слабоотражающего объекта локационными сигналами известной частоты. Для удобства представления скорость движения объекта выражается в км/час, а частота станции в Гц. В этом случае величина частоты модуляции f_c в мГц будет выражаться соотношением

$$f_c = 1.85 f v. \quad (32)$$

Пример 1. Радиолокационная станция сантиметрового диапазона волн: $\lambda = 3$ см, $f = 10$ Гц.

№	v , км/час	f_c , мГц
1	100	0.00185
2	200	0.0037
3	500	0.00925
4	1000	0.0185

Пример 2. Локатор инфракрасного излучения: $\lambda = 10$ мкм,
 $f = 3.000$ ГГц.

№	v , км/час	f , мГц
1	100	0.555
2	200	1.11
3	500	2.78
4	1000	5.55

Разработана методика определения дипольного момента неполярных жидкостей. В ходе проводимых исследований было установлено, что некоторые из используемых в качестве растворителей чистые неполярные жидкости, такие как бензол, диоксан, гексан и др., имели очень слабое затухание волны. Оно проявлялось в том, что в зависимости отраженного сигнала от толщины вещества возникала устойчивая ее аномальная область. Выбранных для исследования жидкостей граница между аномальной и нормальной областями лежала в пределах 10-15-го номера минимума этой зависимости. Вместе с тем из теории линий передач следовало, что у металлической измерительной ячейки с неполярной жидкостью, не обладающей поглощением, коэффициент отражения волны от нее должен быть равен 1 и независим от толщины слоя жидкости в ячейке. На первых порах допускалось, что существование слабого затухания волны в неполярных жидкостях связано с использованием не достаточно чистых продуктов, в которых, по тем или иным причинам, оказались примеси полярных веществ, например влаги в бензоле. Однако, как показали исследования методом релеевского рассеяния света молекулярного строения бензола и алканов, что в этих неполярных веществах могут существовать молекулярные или атомные образования с дипольными моментами. Появилась идея способа доказательства теоретических предположений работы с использованием известных в литературе данных измерений ϵ' , ϵ'' рассматриваемых жидкостей. В расчетах использовались значения диэлектрических потерь ϵ'' жидкости, измеренных при двух разнесенных

частотах, и считалось, что диэлектрические свойства этих веществ в области их дисперсии описываются уравнением Дебая. При дебаевском описании диэлектрических свойств вещества значения их диэлектрических потерь ε''_1 , ε''_2 , измеренные при двух частотах f_1 и f_2 , равны:

$$\varepsilon''_1 = \frac{2\pi f_1 \tau (\varepsilon_0 - \varepsilon_\infty)}{1 + (2\pi f_1 \tau)^2} ; \quad \varepsilon''_2 = \frac{2\pi f_2 \tau (\varepsilon_0 - \varepsilon_\infty)}{1 + (2\pi f_2 \tau)^2} ; \quad (33)$$

где: ε_0 , ε_∞ – статическое и высокочастотное предельные значения диэлектрической проницаемости вещества;

τ – макроскопическое время релаксации.

Если ввести обозначения $\alpha = \varepsilon''_2 / \varepsilon''_1$ и $\beta = f_2 / f_1$, то из совместного решения уравнений (33) следует:

$$\tau = \frac{1}{2\pi f_2} \sqrt{\frac{\alpha - \beta}{1/\beta - \alpha}} . \quad (34)$$

Так как соотношения α и β известны, то из уравнения (34) находится величина макроскопического времени релаксации τ . Для определения дипольного момента молекул вещества в жидкой фазе воспользуемся уравнением:

$$\mu^2 = \frac{(\varepsilon_0 - \varepsilon_\infty)(2\varepsilon_0 + \varepsilon_\infty)}{\varepsilon_0(\varepsilon_\infty + 2)^2} \cdot \frac{9kT}{4\pi N_A} ; \quad (35)$$

где: k – постоянная Больцмана; T – температура;
 N_A – число Авогадро.

Поскольку диэлектрическая проницаемость ε' рассматриваемых жидкостей слабо изменяется с частотой в области дисперсии, считаем, что величина ε_0 мало отличается от величины ε_∞ . Тогда уравнение (35) примет вид:

$$\mu^2 = \frac{3(\varepsilon_0 - \varepsilon_\infty)}{(\varepsilon_\infty + 2)^2} \cdot \frac{9kT}{4\pi N_A} ; \quad (36)$$

Из совместного решения уравнений (33) и (34) следует, что

$$\varepsilon_0 - \varepsilon_\infty = \frac{1 - \beta^2}{\varepsilon_2''} \cdot \frac{1}{\sqrt{(\alpha - \beta)(1/\beta - \alpha)}} \quad (37)$$

По найденной разности $\varepsilon_0 - \varepsilon_\infty$ находится по уравнению (36) значение дипольного момента молекулы выбранной жидкости. Таким способом были найдены μ и τ бензола и алканов. В таблице 5 приведены результаты расчетов по предложенному способу значений времени релаксации и дипольных моментов молекул этих жидкостей. При проведении расчетов использовались литературные данные микроволновых измерений диэлектрических свойств указанных жидкостей⁷.

Таблица 5

Времена релаксации τ и дипольные моменты μ молекул бензола и алканов, полученными по данным измерения их диэлектрических потерь ε''_1 , ε''_2 при двух частотах f_1 , f_2 и температуре 25⁰С.

№	Вещество	f_1 , Гц	f_2 , Гц	ε''_1	ε''_2	τ , 10 ¹² с	μ , D
1	Бензол	24	70	0.0025	0.0059	1.20	0.1
2	Гексан	10	35	0.00058	0.00152	2.80	0.064
3	Гептан	10	35	0.00077	0.00163	3.97	0.066
4	Октан	10	35	0.00092	0.00156	5.13	0.068
5	Нонан	10	35	0.00102	0.00139	6.39	0.068
6	Декан	10	35	0.00106	0.00121	7.56	0.068

У алканов значения дипольных моментов их молекул остаются в пределах 0.065D.

Рассмотренный способ расчета был применен также и для оценки молекулярного времени релаксации полярных веществ по результатам измерения диэлектрических свойств их разведенных растворов в неполярных растворителях.

⁷Ахадов Я.Ю. Диэлектрические параметры чистых жидкостей. М., Изд. МАИ. 2000, 854 с.

Разработан экспресс-метод измерения малого содержания полярного компонента в бинарных растворах. При исследовании характеристик отражения электромагнитной волны бинарных растворов полярных веществ в неполярных растворителях было установлено, что в растворах с малым содержанием полярного компонента осциллирующая и затухающая зависимость отраженного сигнала с увеличением толщины слоя распадается на две внешне отличающиеся области. В первой из них, нормальной, лежащей при повышенных толщинах слоя раствора, с ростом толщины слоя, величины максимумов этой зависимости падают по величине и синхронно с ними возрастают значения минимумов той же зависимости до тех пор, пока они совпадут по величине. Во второй области, обозначенной аномальной и лежащей при малых толщинах слоя вещества, с ростом толщины слоя раствора параллельно происходит уменьшение величины максимумов и минимумов данной зависимости. При этом характерно, что аномальная область такой зависимости возникает при относительно малых концентрациях полярного компонента раствора, т.е. при относительно малом затухании волны в веществе. Исследуя растворы с малыми концентрациями в них полярного компонента, было установлено, что граница раздела нормальной и аномальной областей смещается вдоль оси абсцисс с уменьшением концентрации полярного вещества в растворе. Оказалось, что для любого выбранного бинарного раствора, произведение объемной концентрации полярного компонента раствора и измеренной толщины его слоя, соответствующей границе этих указанных двух областей, остается постоянной величиной. Последнее обстоятельство позволило разработать достаточно простой метод контроля малых концентрации полярного вещества в растворах. Этот метод оказался востребованным при определении малого содержания влаги (полярного вещества) в нефти и нефтепродуктах – одного из важнейшего параметра, используемого в нефтехимической промышленности.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Впервые определены условия полного поглощения электромагнитного излучения при его падении под углом на плоскую просветленную поглощающую подложку. Установлено, что в отличие от падения ПАП волны на такую систему полное поглощение ПОП волны возможно не только при просветляющем угле, но и при угле, аналоге угла Брюстера для прозрачных сред. Найдены условия для выделения нужной поляризационной составляющей падающего излучения.

2. Впервые проведен анализ характеристик отражения электромагнитной волны от плоского слоя поглощающего магнетика, нанесенного на идеальную металлическую подложку. Он позволил установить существование у этих зависимостей нормальной и аномальной областей, отличающихся характером изменения их экстремальных величин с ростом толщины слоя, а также, что их минимумы располагаются вблизи значений толщины слоя, кратных половине длины волны в магнетике. Найдены условия и частотная полоса полного поглощения электромагнитного излучения в плоской системе магнетик-металл. Исследованы их зависимости от избирательных значений магнитных свойств и толщины слоя магнетика.

3. Впервые определены условия полного поглощения электромагнитного излучения при его падении под углом на плоскую двухслойную систему магнетик-металл. Установлено различие в падениях ПАП и ПОП волн на такую систему, что позволяет выделять с ее помощью нужную поляризационную составляющую падающего излучения

4. Впервые проведен анализ характеристик отражения электромагнитной волны от плоского слоя поглощающего магнетика, нанесенного на непоглощающий полубесконечный слой диэлектрика. Он позволил установить существование у этих зависимостей нормальной и аномальной областей, отличающихся характером изменения их экстремальных величин с ростом толщины слоя, а также, что их минимумы располагаются

вблизи значений толщины слоя, кратных половине длины волны в магнетике. Найдены условия и частотная полоса полного поглощения электромагнитного излучения в плоской системе поглощающий магнетик-диэлектрик. Исследованы их зависимости от избирательных значений диэлектрической проницаемости подложки, магнитных свойств и толщины слоя магнитного покрытия.

5. Впервые определены условия полного поглощения электромагнитного излучения при его падении под углом на плоскую двухслойную систему поглощающий магнетик-диэлектрик. Установлено, что в отличие от падения ПАП волны на такую систему полное поглощение ПОП волны возможно не только при просветляющем угле, но и при угле, аналоге угла Брюстера для прозрачных сред. Найдены условия для выделения нужной поляризационной составляющей падающего излучения.

6. Впервые разработаны строгие аналитические уравнения описывающие условия полного прохождения электромагнитного излучения через системы, содержащие периодически чередующие слои из поглощающих диэлектрических и магнитных материалов и непоглощающего слоя диэлектрика. Найдено оптимальное количество сдвоенных слоев (бислоев), которое обеспечивает практически полное гашение проходящего через такую систему излучения.

7. Впервые проведены исследования зависимостей коэффициента отражения волны от толщины слоя жидкого поглощающего диэлектрика и магнетика в свободном пространстве и в волноводе типа TE. Определены функциональные связи между положением и величиной экстремумов этих зависимостей и значениями диэлектрических и магнитных свойств исследуемого вещества. Они позволили разработать на их основе не имеющие аналогов точные микроволновые методы измерения диэлектрических и магнитных свойств жидкостей и растворов с тангенсом угла потерь с $\text{tg}\delta < 0.8$, в том числе с использованием эффекта полного поглощения электромагнитного излучения в слое вещества.

8. Впервые представлены информационные обеспечения для целого ряда разработанных микроволновых методов измерения диэлектрических и магнитных параметров веществ. Обеспечения содержат набор компьютерных программ, которые упрощают нахождение искомых параметров вещества в широком интервале изменения его тангенса угла потерь.

9. Впервые получены системы уравнений описывающие условия и частотную полосу полного поглощения волн в слое поглощающего магнетика, нанесенного на металлическую и непоглощающую диэлектрическую подложку и условия полного гашения волн при их падении под углом на просветленную поглощающую подложку и поглощающие слои диэлектрика и магнетика, нанесенных на металлические и непоглощающие диэлектрические подложки.

10. Впервые получены расчетные уравнения для условий и полосы просветления как поглощающих, так и непоглощающих подложек, а также проведен анализ их поведения в зависимости от толщины и свойств покрытия и подложки.

11. Впервые получены системы уравнений, определяющие значения оптических параметров веществ слоистой системы и толщины слоев просветляющих покрытий, при которых выполняются условия полного поглощения волны заданной частоты.

12. Впервые разработан ряд микроволновых методов измерения диэлектрических и магнитных свойств жидких и твердых веществ.

13. Впервые разработан способ контроля линейной скорости движения слабоотражающего тела и проведена оценка частоты модуляции при зондировании летящего слабоотражающего тела локационными сигналами известной частоты.

14. Разработана методика определения дипольного момента молекул слабополярных жидкостей.

15. Предложен экспресс-метод определения малого (0.01–1% вес.) содержания полярного вещества в неполярном растворителе, например, воды в нефтепродуктах.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ

1. Каджар Ч.О., Касимов Р.М., Касимова С.Р.. Измерения диэлектрических коэффициентов слабопоглощающих жидкостей в диапазоне СВЧ // Измерительная техника. Москва, Россия. 2002, № 7, с.58-59. (Thomson Reuters, Web of Science, Scopus, Springer, Journal Citation Reports, RSCI, Impact Factor: 0,508).
2. Kadjar Ch.O., Kasimov R.M., Kasimova S.R.. Measurements of the dielectric parameters of weakly absorbing liquids in the microwave band // Measurement Techniques. New-York, USA. 2002, vol.45, №7, p.765-768. (Thomson Reuters, Web of Science, Scopus, Springer, Journal Citation Reports, Impact Factor: 0,508).
3. Kadjar Ch.O., Kasimov R.M., Veliev M.I., Kasimova S.R. Determination of dipole momentum and relaxation time of molecular associates of benzole // Journal Transactions NASA (ser. of phys-math. and tec.sc.). 2003, vol.23, №5, pp.3-5.
4. Каджар Ч.О., Касимова С.Р.. Частотные характеристики отражения электромагнитного излучения просветленных тепловых приемников в области их дисперсии волн // Известия НАНА (сер.физ.-мат. и техн.наук). 2004, Т.24, №5, с.85-89.
5. Азизов С.Т., Садыхов М.А., Касимова С.Р., Каджар Ч.О., Касимов Р.М.. Методика выбора толщины слоя и материала микроволновых покрытий // Известия НАНА (сер.физ.-мат. и техн.наук). 2004, Т.24, №5, с.81-84.
6. Каджар Ч.О., Касимов Р.М., Азизов С.Т., Садыхов М.А., Касимова С.Р.. Твердотельные неотражающие поглотители на основе высокодисперсных материалов // Журнал “Бильги” (серия физ.-мат. наук). 2004, №2, с.3-5.
7. Каджар Ч.О., Касимова С.Р.. Условия просветления и частотные характеристики отражения электромагнитного излучения теплового приемника в области его дисперсии волн // Прикладная Физика, Москва, Россия. 2005, №5, с.22-25. (Web of Science, Scopus, RSCI, Impact Factor: 0.328).

8. Велиев М.И., Касимова С.Р., Касимов Р.М, Каджар Ч.О.. Дипольная поляризация нормальных алканов // Химический журнал НАНА. Баку, 2005, №1, с.33-35.
9. Азизов С.Т., Садыхов М.А., Касимова С.Р., Каджар Ч.О.. Метод автоматического контроля концентрации раствора полярного вещества в неполярном растворителе // Известия НАНА (сер.физ.-мат. и техн.наук). 2005, Т.25, №2, с.161-163.
10. Касимова С.Р.. Условия просветления поглощающей подложки при падении на нее под углом поперечно-поляризованной электромагнитной волны // Известия НАНА (сер.физ.-мат. и техн.наук). 2006, Т.26, №2, сс.83-87.
11. Касимова С.Р.. Условия просветления поглощающей подложки при падении на нее под углом параллельно-поляризованной электромагнитной волны // Известия НАНА (сер.физ.-мат. и техн.наук). 2007, Т.27, №2, сс.65-71.
12. Kasimova S.R.. The reflection of transversely polarized wave at its incidence angularly on two-layer system: antireflection coating-absorptive substrate // Journal "Fizika" NASA. 2007, Vol.XIII, №3, pp.50-52.
13. Касимова С.Р.. Безотражательное поглощение электромагнитного излучения при его падении под углом на просветленную поглощающую подложку. Инженерно-физический журнал. Минск, Беларусь. 2008, Т.81, №2, с.223-228. (Web of Science, Scopus, INSPEC, ADS, CAS, EBSCO, CSA, OCLC, Impact Factor: 1,118).
14. Kasimova S.R.. Reflectionless absorption of electromagnetic radiation incident at an angle upon a clarified absorbing substrate // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. USA, New-York. 2008, Vol. 81, №2, P.236-241. (Web of Science, Scopus, CAS, INSPEC, ADS, EBSCO, CSA, OCLC, SJR, Impact Factor: 0,706).
15. Касимова С.Р.. Условия просветления теплового приемника электромагнитного излучения в области дисперсии волн // Известия НАНА (сер.физ.-мат. и техн.наук). 2008, Т.28, №2, сс.113-116.

16. Касимова С.Р., Касимов Р.М., Джавадов Н.Г.. Отражение параллельно-поляризованной волны при ее падении под углом на просветленную поглощающую подложку // *Материалы X международного научно-практического семинара “Практика и перспективы партнерства в сфере высшей школы”*. Донецк, Украина, 2009, т.2., сс.148-153.
17. Gasimova S.R.. Translucence coverings for thermal receivers and converters of electromagnetic radiation // *Booklet. Science Opportunities in Azerbaijan. Science & Technology Center In Ukraine*. 2009, p.43. (STCU, USA, Canada, EU).
18. Касимов Р.М., Касимова С.Р.. Двухслойный неотражающий поглотитель электромагнитного излучения. *Инженерно-физический журнал*. Минск, Беларусь. 2009, т.82, № 3, с.606-609. (Web of Science, Scopus, CAS, INSPEC, ADS, EBSCO, CSA, OCLC, SJR, Impact Factor: 1,118).
19. Kasimov R.M., Kasimova S.R.. Two-layer nonreflective absorber of electromagnetic radiation // *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. New-York, USA. Vol.82, №3, 2009, p.604-607. (Web of Science, Scopus, CAS, INSPEC, ADS, EBSCO, CSA, OCLC, SJR, Impact Factor: 0,706).
20. Касимов Р.М., Мамедов Э.М., Касимова С.Р.. Исследование возможности расширения диапазона применимости микроволнового метода измерения влагосодержания в нефтепродуктах // *Химический журнал НАНА*. 2009, № 1, сс.140-143.
21. Исмибейли Э.Г., Касимова С.Р.. Характеристики отражения электромагнитного излучения двухслойной системы магнетик-металл // *Научно-технический журнал “Ученые записки”*. Баку, Азербайджан. 2010, № 4, сс.3-6.
22. Касимов Р.М., Касимова С.Р.. Безотражательное поглощение электромагнитной волны при ее падении под углом на двухслойную систему магнетик-металл // *Инженерно-физический журнал*. Минск, Беларусь. 2011, т.84, № 4, с.735-739. (Web of Science, Scopus, CAS, INSPEC, ADS, EBSCO, CSA, OCLC, SJR, Impact Factor: 1,118).
23. Kasimov R.M., Kasimova S.R.. Nonreflective absorption of an electromagnetic wave in its incidence on the two-layer system

- "magnetic–metal" at an angle. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics* // New-York, USA. 2011, Vol.84, № 4, pp.794-798. (Web of Science, Scopus, CAS, INSPEC, ADS, EBSCO, CSA, OCLC, SJR, Impact Factor: 0,706).
24. Касимов Р.М., Касимова С.Р.. Безотражательное прохождение электромагнитного излучения при его падении под углом на поглощающий слой диэлектрика. *Инженерно-физический журнал* // Минск, Беларусь. 2011, т.84, №4, с.729-734. (Web of Science, Scopus, CAS, INSPEC, ADS, EBSCO, CSA, OCLC, SJR, Impact Factor: 1,118).
25. Kasimov R.M., Kasimova S.R.. Nonreflective passage of electromagnetic radiation on its incidence at an angle on the absorbing layer of a dielectric // *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. New-York, USA. 2011, Vol. 84, Is.4, pp.787-793. (Web of Science, Scopus, CAS, INSPEC, ADS, EBSCO, CSA, OCLC, SJR, Impact Factor: 0,706).
26. Касимов Р.М., Касимова С.Р.. Безотражательное поглощение электромагнитного излучения при его падении под углом на просветленную поглощающую подложку // *Прикладная Физика*. Москва, Россия. 2011, № 3, сс.18-24. (Web of Science, Scopus, RSCI, Impact Factor: 0.328).
27. Касимов Р.М., Касимова С.Р.. Безотражательное гашение электромагнитного излучения в слоистой поглощающей системе периодической структуры // *Химический журнал*. НАНА. 2011, № 2, сс.33-37.
28. Kasimov R.M., Ismibayli E.G., Kasimova S.R.. Dataware of the measuring methods of the dielectric properties of absorbing liquid on microwave frequency // *International Conference on Communications, Control and Information Technology*. World Academy Of Science, Engineering And Technology. Paris, France. 2011, Issue 80, p.1226-1233. (Google Scholar, Semantic Scholar, Zenedo, OpenAIRE, BASE, WorldCAT, Sherpa/RoMEO). Certificate of Presentation.
29. Mamedov H.A., Ismibayli E.G., Kasimova S.R.. Reflectionless absorbtion electromagnetic radiation // *International Conference on Computer, Electrical, and Systems Sciences, and Engineering*.

World Academy Of Science, Engineering And Technology. Venice, Italy. 2011, Is. 59, Nov. 28-30, p.3394-3399. (Open Science Index, Google Scholar, Open BASE, Semantic Scholar, Zenedo, AIRE, WorldCAT, Sherpa/RoMEO). Certificate of Presentation.

30. Касимов Р.М., Касимова С.Р.. Дипольные моменты и времена релаксации молекул бензола и алканов // «XIX Менделеевский съезд по общей и прикладной химии». Волгоград, Россия. 25-30 сентября 2011 года, Том 4, стр.473.
31. Касимов Р.М., Исмибейли Э.Г., Касимова С.Р.. Измерения магнитных свойств жидких магнетиков в волноводах // Измерительная техника. Москва, Россия. 2011, № 6, с.51-53. (Thomson Reuters, Web of Science, Scopus, Springer, JCR, RSCI. Impact Factor: 0,508).
32. Kasimov R.M., Ismibayli E.Q., Kasimova S.R.. Measurements of the magnetic properties of magnetic liquids in waveguide // Measurement Techniques. USA, New-York. 2011, Vol.54, Is.6, pp.703-706. (Thomson Reuters, Web of Science, Scopus, Springer, JCR, RSCI. Impact Factor: 0,508).
33. Mamedov H.A., Ismibayli E.G., Kasimova S.R.. Компьютеризованные методы измерения магнитных свойств жидких магнетиков на сверхвысоких частотах // Proceedings Of The International Scientific And Technical Conference “Prospects Of Development Of Modern Information And Communication Technologies”. Baku. 22-24 September 2011, p.498-503.
34. Ismibayli E.G., Kasimova S.R.. Environmental protection from the exposure of the electromagnetic radiation // World Forum–International Congress “Natural Cataclysms And Global Problems Of The Modern Civilization”. Istanbul, Turkey. 2011. 19-21 Sept., p.216.
35. Мамедов Г.А., Исмибейли Э.Г., Касимова С.Р.. Безотражательное прохождение электромагнитного излучения через систему магнетик-диэлектрик // Инженерно-физический журнал. Минск, Беларусь. 2012, Т.85, №3, с.660-664. (Web of Science, Scopus, CAS, INSPEC, ADS, EBSCO, SJR, CSA, OCLC. Impact Factor: 1,118).

36. Mamedov H.A., Ismibayli E.G., Kasimova S.R.. Reflectionless transmission of electromagnetic radiation through a magnetic-dielectric system // *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, USA, New-York. 2012, Vol. 85, Is.3, pp.716-720. (Web of Science, Scopus, CAS, INSPEC, ADS, EBSCO, CSA, OCLC, SJR, Impact Factor: 0,706).
37. Исмибейли Э.Г., Касимова С.Р.. Двухслойное просветление поглощающей подложки // *Прикладная Физика*. Москва, Россия. 2012, №4, сс. 34-36. (Web of Science, Scopus, RSCI, Impact Factor: 0.328).
38. Касимов Р.М., Касимова С.Р.. Неотражающие микроволновые поглотители с высокодисперсными жидкими наполнителями // *Химический журнал НАНА*. 2013, №3, pp.55-57.
39. Касимова С.Р.. Безотражательное поглощение параллельно-поляризованной электромагнитной волны в плоской двухслойной системе магнетик-металл // *Химический журнал НАНА*. 2013. №4, с.91-95
40. Касимова С.Р.. Безотражательное поглощение поперечно-поляризованной электромагнитной волны в плоской двухслойной системе магнетик-металл // *Химический журнал НАНА*. 2014, №1, pp.78-82.
41. Касимов Р.М., Касимова С.Р.. Частотная полоса просветления плоских двухслойных прозрачных сред // *Химический журнал НАНА*. 2014, №2, стр.99-103.
42. Касимов Р.М., Касимова С.Р.. Условия полного поглощения электромагнитного излучения плоской двухслойной системы магнетик-металл // *Химический журнал НАНА*. 2014, №3, стр.68-72.
43. Gasimova S.R., Gasimov E.R.. Two layer nonreflecting absorber of electromagnetic radiation with magnetic absorbing coating // *International Academic Conference on Engineering, Internet and Technology*. Prague, Czech Republic. 2014, dec.12-13, pp.234-237. (Impact Factor:0,966. Scientific Indexing Services USA). Certificate.
44. Касимов Р.М., Касимова С.Р.. Выделение заданной поляризованной составляющей электромагнитного излучения при

- его отражении от плоской двухслойной системы магнетик-металл // Химический журнал НАНА. 2014, №4, стр.102-107.
- 45.Касимова С.Р.. Измерение диэлектрических свойств сильно поглощающих веществ на сверхвысоких частотах // Метрология. Москва, Россия. 2015, №4, стр. 60-65. (Thomson Reuters, Web of Science, Scopus, Springer, ESCI, RSCI. Impact Factor: 0,216)
- 46.Касимова С.Р., Касимов Э.Р.. Выделение заданной поляризованной составляющей электромагнитного излучения при его отражении от просветленной поглощающей подложки // Инженерно-физический журнал. Минск, Беларусь. 2015, т.88, №5, с.1138-1144. (Web of Science, Scopus, CAS, INSPEC, ADS, EBSCO, CSA, OCLC, SJR, Impact Factor: 1,118).
- 47.Kasimova S.R., Kasimov E. R.. Separation of an Assigned Polarization Component of Electromagnetic Radiation in its Reflection from an Antireflection Absorbing Substrate // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. USA, New-York. 2015, Vol.88, Is.5, pp 1175-1182. (Web of Science, Scopus, CAS, INSPEC, ADS, EBSCO, CSA, OCLC, SJR, ImpactFactor: 0,706).
- 48.Касимов Р.М., Исмибейли Э.Г., Касимова С.Р.. Способ определения скорости движения тела // Евразийский Патент. №022902. 31.03.2016. G01S 13/58.
- 49.Касимова С.Р.. Методы измерения диэлектрических и магнитных свойств твердых и жидких веществ в диапазоне сверхвысоких частот // Монография. 2016. стр.175. (Qrif K370100000092/№98-2016).
- 50.Kasimova S.R.. Measurements of the Dielectric Properties of Strongly Absorbing Substances at Microwave Frequencies // Measurement Techniques. USA, New-York. 2016. Vol.58, Is.12, pp. 1372-1375. (Thomson Reuters, Web of Science, Scopus, Springer, JCR, RSCI. Impact Factor: 0,508).
51. Kasimova S.R.. Application of the method of pulse sounding the substance for identifying and measuring the dielectric properties of polar liquids // Paradigmata Poznání. Prague, Czech Republic. №3, 2017, стр. 59-62. (Impact Factor: 0,966. Scientific Indexing Services USA). Certificate.

52. Kasimova S.R.. Increase in reflective ability of coverings // *Paradigmata Poznání*. Prague, Czech Republic. №4, 2017, стр. 59-62. (Impact Factor: 0,966. Scientific Indexing Services USA). Certificate.
53. Kasimova S.R.. Метод измерения магнитных свойств сильно поглощающих веществ на сверхвысоких частотах // *Paradigmata Poznání*. Prague, Czech Republic. 2018, №3, стр. 61-65. (Impact Factor: 0,966. Scientific Indexing Services USA). Certificate.
54. Касимова С.Р.. Метод измерения сильно поглощающих диэлектриков с применением согласующей неполярной жидкости // *Наука, техника и образование*. Москва, Россия. 2018. №8 (49), стр.24-27. (Open Academic Journals Index, Google Academy, Ulrich's Periodicals Directory (USA), Impact Factor: 1,84). Certificate.
55. Касимова С.Р.. Улучшение отражательной способности плоских покрытий // *Инженерно-физический журнал*. Минск, Беларусь. 2018, Т.91, №6, стр.1674-1677. (Web of Science, Scopus, CAS, INSPEC, ADS, EBSCO, CSA, OCLC, SJR, Impact Factor: 1,118).
56. Kasimova S.R.. Improvement of the reflectivity of flat coatings // *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. USA, New-York. 2018, Vol.91, Is.6, pp. 1592–1594. (Web of Science, Scopus, CAS, INSPEC, ADS, EBSCO, CSA, OCLC, SJR, Impact Factor: 0,706).
57. Kasimova S.R., Kasimov E.R.. Полное поглощение электромагнитной волны в двухслойной системе магнитодиэлектрик-металл. // *Paradigmata Poznání*. Czech Republic, Prague. 2019, №4, стр.18-20. (Impact Factor: 0,966. Scientific Indexing Services). Certificate.
58. Касимова С.Р.. Информационное обеспечение методов измерения диэлектрических свойств поглощающих жидкостей // *Наука, техника и образование*. Москва, Россия. 2021, №4(79), с.22-24. (Open Academic Journals Index, Google Academy, Ulrich's Periodicals Directory (USA), Impact Factor: 1,84). Certificate.



Защита диссертации состоится 24 сентября 2021 года в 11⁰⁰ на заседании Диссертационного совета ЕД 2.41 действующего на базе Азербайджанского Технического Университета

Адрес: пр. Г.Джавида 25, Баку, Азербайджан AZ-1073.
Азербайджанский Технический Университет

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке
Азербайджанского Технического Университета

Электронная версия диссертации и автореферата размещена на официальном сайте Азербайджанского Технического Университета www.aztu.edu.az

Автореферат разослан по соответствующим адресам
05 августа 2021 года

Подписано в печать: 07.07.2021

Формат бумаги: А5

Объём: 78320

Тираж: 100