

УДК 621.317.39.084.2

Определение значений статических относительных диэлектрических проницаемостей полярных газов по результатам радиотехнических измерений

Determination of the values of static relative dielectric permeabilities of polar gases based on the results of radio engineering measurements

Кравченко / Kravchenko V.

Виктория Викторовна
(vik41.66@mail.ru)
кандидат технических наук.
ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения» (ГУАП), старший преподаватель кафедры радиотехнических и оптоэлектронных комплексов.
г. Санкт-Петербург

Крячко / Kryachko A.

Александр Федотович
(alex_k34ru@mail.ru)
доктор технических наук, профессор.
ГУАП, заведующий кафедрой радиотехнических и оптоэлектронных комплексов.
г. Санкт-Петербург

Прусов / Prusov A.

Андрей Владимирович
(vik41.66@mail.ru)
кандидат технических наук, старший научный сотрудник, доцент.
ГУАП, доцент кафедры радиотехнических и оптоэлектронных комплексов.
г. Санкт-Петербург

Ревунов / Revunov G.

Глеб Михайлович
(revunpank@gmail.ru)
кандидат технических наук.
ГУАП, ассистент кафедры радиотехнических и оптоэлектронных комплексов.
г. Санкт-Петербург

Ключевые слова: статическая относительная диэлектрическая проницаемость – static relative permittivity; полярные газы – polar gases.

В статье рассмотрена задача определения значений статической относительной диэлектрической проницаемости любых полярных газов по результатам радиотехнических измерений при известных значениях их коэффициентов преломления и известных давлениях и температурах газов и времени установления дипольной поляризации порядка 10^{-10} с. Приведено математическое выражение для расчёта значений статической относительной диэлектрической проницаемости полярных газов.

The article considers the problem of determining the values of the static relative permittivity of any polar gases based on the results of radio engineering measurements, given the known values of their refractive indices and the known pressures and temperatures of the gases, as well as the time required for dipole polarization to establish at a rate of 10^{-10} s. A mathematical expression is provided for calculating the values of the static relative permittivity of polar gases.

Введение

Производство различных химических продуктов неразрывно связано с производством и транспортировкой полярных газов по газопроводам. Газопроводы обязательно предполагают наличие целого комплекса радиотехнических средств контроля давления газов в газопроводе, средств контроля влажности газов и других аналогичных средств, в которых параметры газовых сред являются информационными.

Выбор диапазона рабочих частот радиотехнических средств, обслуживающих газопроводы, проводится, используя значение частотной зависимости относительной диэлектрической проницаемости газов $\epsilon_r(2\pi \cdot f)$, перекачиваемых по газопроводу.

Пути решения

Частотная зависимость относительной диэлектрической проницаемости $\epsilon_r(2\pi \cdot f)$ полярных газов отличается от частотной зависимости относительной диэлектрической проницаемости неполярных газов

наличием резко выраженной нелинейности в диапазоне частот от нуля до примерно 6000 МГц [1, 2], что объясняется структурой молекул полярного газа, для которых существует наряду с электронной поляризацией ещё и дипольная поляризация при переменных синусоидальных электрических полях.

Время установления дипольной поляризации полярных газов τ при их работе в переменных электрических полях радиотехнических систем составляет величину порядка 10^{-10} с, что значительно больше времени установления электронной поляризации, которая имеет величину порядка 10^{-15} с, то есть устанавливается практически мгновенно [3]. Разница во времени установления электронной и дипольной поляризации и обуславливает наличие нелинейности частотной зависимости относительной диэлектрической проницаемости полярных газов $\epsilon_r(2\pi \cdot f)$.

Относительная диэлектрическая проницаемость полярных газов при их нахождении в переменных синусоидальных электрических полях ϵ_r является комплексной величиной

$$\dot{\epsilon}(2\pi \cdot f) = \epsilon'(2\pi \cdot f) + i \cdot \epsilon''(2\pi \cdot f).$$

Зависимость комплексной относительной диэлектрической проницаемости от частоты задаётся уравнением Дебая [4].

$$\dot{\epsilon}(2\pi \cdot f) = \epsilon_{\text{опт}} + \frac{\epsilon_{\text{ст}} - \epsilon_{\text{опт}}}{1 + i2\pi \cdot f \cdot \tau},$$

где действительная составляющая комплексной относительной диэлектрической проницаемости рассчитывается по формуле

$$\epsilon'(2\pi \cdot f) = \epsilon_{\text{опт}} + \frac{\epsilon_{\text{ст}} - \epsilon_{\text{опт}}}{1 + (2\pi \cdot f \cdot \tau)^2} \quad (1)$$

и характеризует частотную зависимость относительной диэлектрической проницаемости газов, а мнимая составляющая комплексной относительной диэлектрической проницаемости рассчитывается по формуле

$$\epsilon''(2\pi \cdot f) = \frac{2\pi \cdot f \cdot \tau (\epsilon_{\text{ст}} - \epsilon_{\text{опт}})}{1 + (2\pi \cdot f \cdot \tau)^2} \quad (2)$$

и характеризует активные потери газа, которые, как правило, имеют малую величину из-за очень малой проводимости осушенных газов.

В формулах (1) и (2)

$\epsilon_{\text{ст}}$ – статическое значение относительной диэлектрической проницаемости полярного газа, которое определяет значение ϵ_r , работающего в постоянных или медленно изменяющихся внешних электрических синусоидальных полях с граничными значениями частот до единиц мегагерц;

$\epsilon_{\text{опт}}$ – практически безынерционная оптическая относительная диэлектрическая проницаемость, которую имеет газ на частотах оптического диапазона;

τ – время установления дипольной поляризации молекул полярных газов.

Будем считать, что $\epsilon_{\text{опт}} = n^2$, где n – коэффициент преломления полярного газа.

Значения коэффициентов преломления газов (как полярных, так и неполярных), как правило, публикуются в физических справочниках и измеряются оптическими методами на частотах оптического диапазона.

С определением значений статической относительной диэлектрической проницаемости полярных газов $\epsilon_{\text{ст}}$ дела обстоят намного хуже. В справочниках публикуются значения $\epsilon_{\text{ст}}$ только отдельных полярных газов, как правило, измеренные на очень низких частотах, а частотная зависимость относительной диэлектрической проницаемости полярных газов $\epsilon_r(2\pi \cdot f)$ практически нигде не публикуется.

Проведём оценку значений $\epsilon_{\text{ст}}$ полярных газов исходя из уравнения Дебая, записанного для действительной части комплексной относительной диэлектрической проницаемости полярных газов. Перепишем формулу (1) в следующем виде:

$$\epsilon'(2\pi \cdot f) \cdot [1 + (2\pi \cdot f \cdot \tau)^2] = \epsilon_{\text{ст}} + \epsilon_{\text{опт}} \cdot (2\pi \cdot f \cdot \tau)^2. \quad (3)$$

Выразим из формулы (3) значение $\epsilon_{\text{ст}}$:

$$\epsilon_{\text{ст}} = \epsilon_r(2\pi \cdot f) \cdot [1 + (2\pi \cdot f \cdot \tau)^2] - \epsilon_{\text{опт}} \cdot (2\pi \cdot f \cdot \tau)^2.$$

Рассчитаем значения статической относительной диэлектрической проницаемости полярных газов $\epsilon_{\text{ст}}$ по формуле (3) на нескольких частотах дециметрового диапазона и начала сантиметрового диапазона от 300 МГц до 6000 МГц.

В качестве примера приведём определения значений $\epsilon_{\text{ст}}$ полярного газа – сухого аммиака NH_3 , находящегося при температуре газа $T=300$ К и давлении $p=10^5$ Па, для которого полностью известны взятые из физических справочников значения $\epsilon_{\text{ст}}=1,00776$ и $\epsilon_{\text{опт}}=1,00025$.

Будем считать, что для этого газа при указанных значениях давления и температуры время установления дипольной поляризации $\tau_{\text{ср}}=0,93 \cdot 10^{-10}$ с.

Для расчёта значений $\epsilon_{\text{ст}}$ на нескольких частотах по формуле (3) и определения среднего значения $\epsilon_{\text{ст}}$ сухого аммиака NH_3 необходимо на этих частотах определить экспериментальные значения относительной диэлектрической проницаемости вышеуказанного газа ϵ_r .

Для этого авторами было разработано устройство измерения частотной зависимости относительной диэлектрической проницаемости, электрическая

эквивалентная схема и принцип действия которого приведены в [5].

Экспериментальные значения относительной диэлектрической проницаемости ϵ_r и значения частот, на которых проводились измерения, сведены в таблицу 1.

Рассчитаем по формуле (3) значения статической относительной диэлектрической проницаемости $\epsilon_{ст}$ сухого аммиака на частотах, приведённых в таблице 1.

На рис. 1 приведены результаты расчетов $\epsilon_{ст}$ на вышеуказанных частотах и экспериментальное определение среднего значения статической относительной диэлектрической проницаемости $\epsilon_{ст.ср}$ сухого аммиака.

Из приведённых расчетов и рис. 1 следует, что для сухого аммиака как типичного полярного газа

среднее значение статической относительной диэлектрической проницаемости $\epsilon_{ст.ср} = 1,00772$ при $T=300\text{ K}$ и давлении $p=10^5\text{ Па}$ вполне соответствует оценке $\epsilon_{ст.} = 1,00776$, приведённой в физических справочниках с относительной погрешностью определения значений $\epsilon_{ст.}$ не более 0,004%.

Выводы

Можно утверждать, что решена задача определения значений статической относительной диэлектрической проницаемости $\epsilon_{ст}$ любых полярных газов по результатам радиотехнических измерений при известных значениях их коэффициентов прелом-

Таблица 1

Экспериментальные значения относительной диэлектрической проницаемости сухого аммиака при $T=300\text{ K}$ и давлении $p=10^5\text{ Па}$

$f, \text{ МГц}$	300	2000	4000	6000
$\epsilon_r(2\pi f)$	1,00753	1,00342	1,00140	1,00081

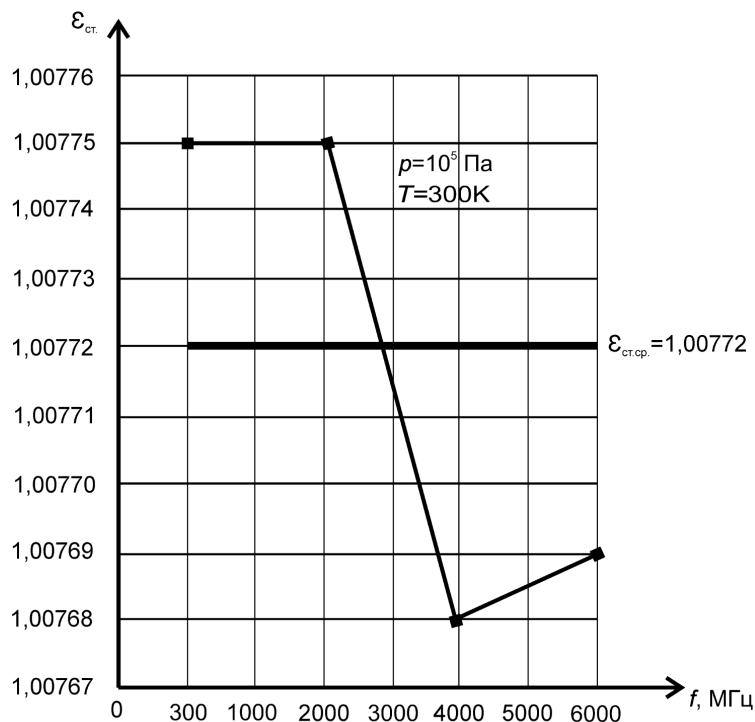


Рис. 1. Экспериментальное определение среднего значения статической относительной диэлектрической проницаемости $\epsilon_{ст.ср}$ сухого аммиака

ления и известных давлениях и температурах газов, а также даже неизвестных значениях времени установления дипольной поляризации τ . Для расчётов достаточно использовать значение $\tau=10^{-10}$ с для всех полярных газов, при этом погрешность определения $\epsilon_{ст}$ не превысит долей процента.

Приведено математическое выражение для расчёта значений статической относительной диэлектрической проницаемости полярных газов.

Литература

1. Мулев, Ю.В. Методика расчета диэлектрической проницаемости аммиака в широком диапазоне параметров / Ю.В. Мулев, С.Н. Смирнов // Юмас [сайт]. – URL : <https://jumas.ru/information/metodika-raschyota-dielektricheskoy-pronicaemosti-ammiaka-v-shirokom-diapazone-parametrov.php> (дата обращения: 27.02.2026).
2. Lechner, M.D. Landolt-Bornstein, Static Dielectric Constants of Pure Liquids and Binary Liquids Mixtures / M.D. Lechner, C. Wohlfarth. – Berlin : Springer-Verlag, 1991. – 203 p.
3. Нигматуллин, Р.Р. Что такое диэлектрическая спектроскопия? Это спектроскопия коллективных движений / Р.Р. Нигматуллин // Георесурсы. – 2005. – № 2 (17). – С. 7–14.
4. Мустафаева, С.Н. Комплексная диэлектрическая проницаемость и АС-проводимость монокристаллов GaSe, выращенных из газовой фазы / С.Н. Мустафаева, М.М. Асадов // Журнал радиоэлектроники. – 2011. – № 8. – С. 3.
5. Fomin, S.V. Dielectric Model for Thawed Mineral Soils at a Frequency of 435 MHz / S.V. Fomin, K. Muzalevskiy // IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters. – 2021. – Vol. 18, No. 2. – P. 222–225.
6. Исследование диэлектрической проницаемости нефтесодержащих пород в диапазоне частот 0.05–16 ГГц / М.И. Эпов, В.Л. Миронов, П.П. Бобров [и др.] // Геология и геофизика. – 2009. – Т. 50, № 5. – С. 613–618.
7. Валиева, Л.Ф. Газы. Диэлектрические потери в газах и их электропроводность / Валиева, Л.Ф. // Вестник науки. – 2024. – № 9 (78), Т. 2. – С. 462–469. – URL : <https://www.vestnik-nauki.rf/article/17212> (дата обращения: 27.02.2026).
8. Макаров, В.П. Диэлектрическая проницаемость одноатомного газа при учете пространственной дисперсии / В.П. Макаров, А.А. Рухадзе // ЖЭТФ. – 2004. – Т. 125, Вып. 2. – С. 345–355.
9. Калуцков, О.А. Нелинейная модель возникновения устойчивых состояний в газовой смеси в присутствии внешних электрических и магнитных сил / О.А. Калуцков, Л.А. Уварова // Вестник МГТУ «Станкин». – 2016. – № 4 (39). – С. 113–116.
10. Калуцков, О.А. Моделирование массопереноса нано- и мезообъектов в газовой среде под действием электромагнитного поля / О.А. Калуцков, Л.А. Уварова // Моделирование нелинейных процессов и систем : материалы пятой международной конференции (Москва, 16–20 ноября 2020 г.). – 2021. – С. 201–202.