

МОСКОВСКИЙ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)

Физтех-школа аэрокосмических технологий

Лабораторная работа №4.2.3
Интерферометр Релея

Работу выполнили
Лохматов Арсений Игоревич
Козярский Алексей Сергеевич
Б03-303



Долгопрудный, 2025

1 Теоретическая часть

Цель работы: ознакомление с интерференцией на двух щелях, устройством и принципом действия интерферометра Релея и с его применением для измерения показателей преломления газов.

В работе используются: технический интерферометр ИТР-1, светофильтр, баллон с углекислым газом, сиффон, манометр, краны.

Экспериментальная установка. Интерферометр Релея — прибор для измерения разности показателей преломления — основан на явлении дифракции света на двух параллельных щелях. Схема прибора представлена на рис. 1 в вертикальной и горизонтальной проекциях. Лампа накаливания Λ с помощью конденсора K ярко освещает узкую входную щель S , расположенную в фокусе объектива O_1 (фокусное расстояние f). Коллиматор, состоящий из щели S и объектива O_1 , посылает параллельный пучок на диафрагму D с двумя вертикальными щелями (расстояние между щелями d). Свет после двойной щели проходит кювету L , состоящую из двух одинаковых стеклянных камер, в которые вводятся исследуемые газы (в нашей установке — CO_2 или воздух). Кювета занимает только верхнюю часть пространства между объективами O_1 и O_2 , длина кюветы l . За кюветой расположены две стеклянные пластинки J (компенсатор Жамена, см. ниже) и пластинка Π .

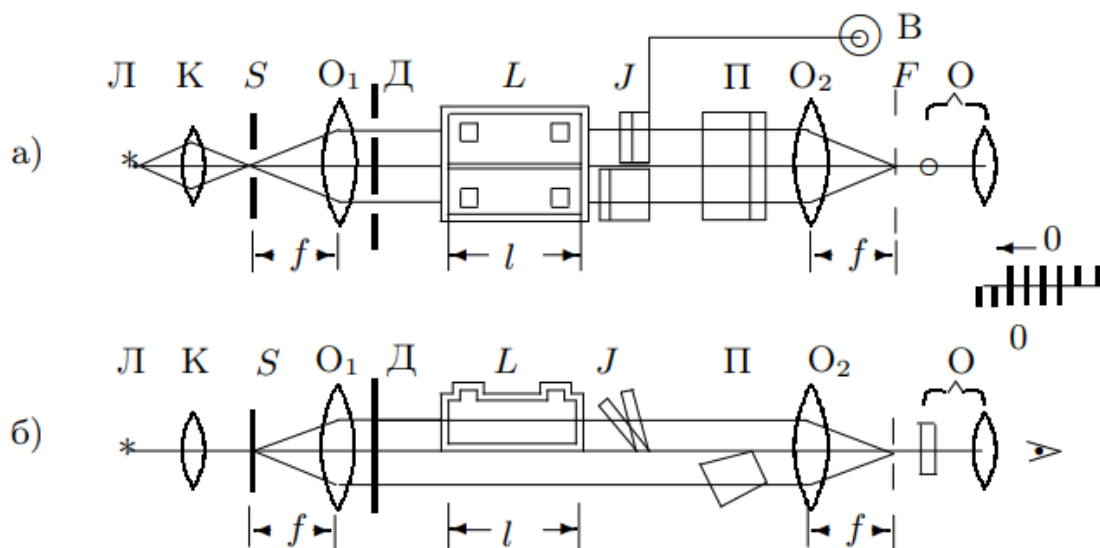


Рис. 1: Устройство интерферометра Релея: а) вид сверху; б) вид сбоку

Интерференционная картина (картина дифракции на двух щелях), наблюдаемая в фокальной плоскости F объектива O_2 , представляет собой две системы равноотстоящих полос, параллельных щелям: верхняя (подвижная) образована лучами, прошедшими через кювету, нижняя (неподвижная) — лучами, прошедшими под кюветой. Обе системы интерференционных полос разграничены при помощи пластины Π тонкой разделительной линией. Для наблюдения двух систем полос в окуляре применена цилиндрическая линза диаметром 2.2 мм, ось которой расположена вертикально. Вторая («глазная») линза окуляра — обычная сферическая. Она служит для подстройки чёткости картины под глаз наблюдателя.

При малых дифракционных углах $\varphi = \lambda/d$ расстояние между соседними светлыми (или тёмными) полосами δy зависит от длины волны λ , фокусного расстояния f объектива O_2 и расстояния между дифракционными щелями d :

$$\delta y = f \frac{\lambda}{d}.$$

В техническом интерферометре ИТР-1, который используется в нашей работе, $f \approx 20$, см, $d \approx 1.5$, см, δy оказывается порядка 10^{-3} см. Для наблюдения таких мелких интерференционных полос требуется окуляр с большим увеличением ($\gamma \approx 150^\circ$). Короткофокусная цилиндрическая линза окуляра O сильно растягивает интерференционную картину по горизонтали, не меняя её вертикальных размеров и тем самым мало ослабляя освещённость полос. Изображение светящейся точки в фокальной плоскости объектива O_2 при рассматривании через цилиндрическую линзу имеет вид светлой вертикальной линии, длина которой определяется диаметром объектива. Поэтому распределение освещённости в нижней части светлой линии зависит от действия нижней части объектива, а в верхней части линии — от верхней части объектива. Таким образом, наблюдатель видит две системы полос: верхняя образована лучами, прошедшими через кюветы, нижняя — лучами, прошедшими под кюветами.

При заполнении камер газами с одинаковым показателем преломления n обе системы полос совпадают. Оптическая разность хода $\Delta = \delta n \cdot l$, возникающая при прохождении света через камеры с разными газами $\delta n = n_2 - n_1$, ведёт к поперечному смещению верхней дифракционной картины относительно неподвижной нижней. Смещение на одну полосу соответствует дополнительной разности хода $\Delta = \lambda$. Просчитав число полос m между центрами обеих картин, можно рассчитать

$$\delta n = \frac{\Delta}{l} = m \frac{\lambda}{l}.$$

Для точного измерения разности хода используется компенсатор Жамена (J на рисунке 1) — устройство, которое позволяет вернуть подвижную систему полос к первоначальному положению, т. е. вновь совместить обе системы полос. В установке компенсатор Жамена расположен за кюветой. Он состоит из двух одинаковых плоскопараллельных стеклянных пластинок, установленных на пути лучей под углом 45° к горизонтали. Вращение одной из пластин вокруг горизонтальной оси, перпендикулярной оси системы, вызывает увеличение или уменьшение оптической длины пути соответствующего луча. Ось вращения снабжена рычагом, конец которого смещается при помощи микрометрического винта B .

Интерферометр Релея можно применять для измерения небольших изменений показателей преломления жидкостей или газов, а также для определения примесей различных газов в воздухе (например, для измерения концентрации рудничного газа в шахте). Показатель преломления n исследуемого газа определяется путём сравнения с воздухом при атмосферном давлении:

$$n = n_{\text{возд}} + \frac{\Delta}{l}.$$

Для определения величины Δ , компенсатор следует прокалибровать.

2 Практическая часть

В работе предлагается исследовать изменение показателя преломления воздуха при изменении давления и определить разность показателей преломления воздуха и углекислого газа при атмосферном давлении. По результатам измерений рассчитываются показатели преломления соответствующих газов при нормальных условиях.

2.1 Подготовка установки к работе

1. Включили осветитель интерферометра в сеть и убедились, что в поле зрения окуляра видны две системы интерференционных полос.

- Ознакомились с устройством газовой системы. Уравняли давления в обеих камерах кюветы: первую соединили с атмосферой, открыв краны K_1 и K_2 , а вторую продули с помощью груши Г, чтобы удалить из неё остатки углекислого газа. При этом кран K_0 находится в положении 3.

2.2 Калибровка компенсатора

- Провели юстировку и калибровку прибора. Для калибровки наденемли на окуляр красный светофильтр и сняли зависимость показаний микрометрической шкалы компенсатора Жамена от порядкового номера интерференционного максимума. Результаты измерений представлены в таблице 1 и на графике 2.

m , номер полосы	-10	-9	-8	-7	-6	-5	-4	-3	-2	-1
z_m , МКМ	-2.88	-2.57	-2.26	-1.93	-1.61	-1.3	-0.99	-0.67	-0.32	-0.01
m , номер полосы	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
z_m , МКМ	0.3	0.64	0.97	1.31	1.63	1.93	2.26	2.59	2.93	3.23

Таблица 1: Калибровка компенсатора

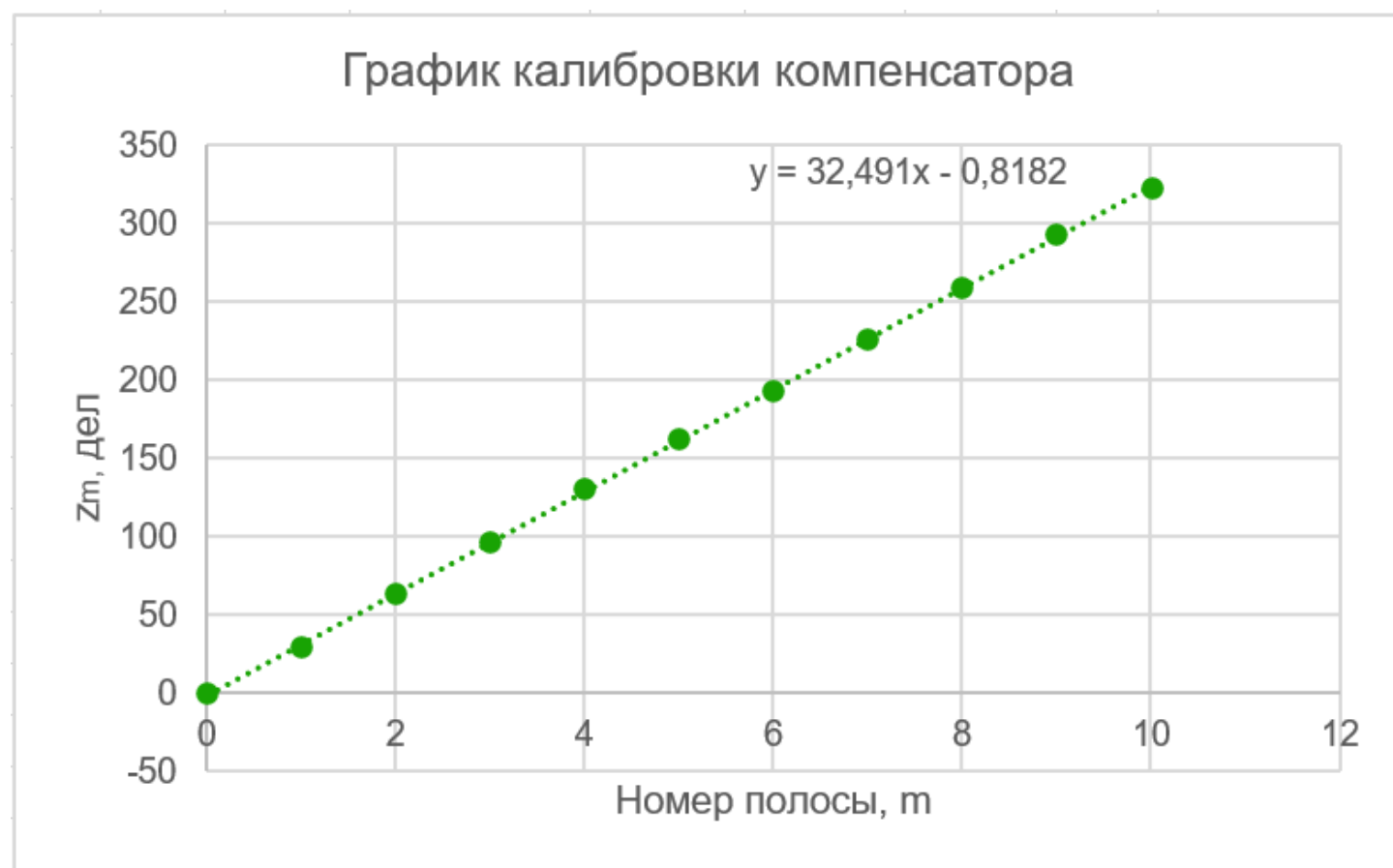


Рис. 2: График калибровки компенсатора

Длина кюветы $l = 10$ см, а длина волны, пропускаемая светофильтром $\lambda = 620 \div 720$ нм – в среднем $\lambda \approx 670$ нм. Тогда 32 деления компенсатора соответствуют 670 нм.

- По формуле перейдем от делений компенсатора к величине δn :

$$\delta n = m \frac{\lambda}{l}, \quad (1)$$

при этом из графика 1: $\Delta m = \frac{\Delta z}{\operatorname{tg} \varphi_1}$, где $\operatorname{tg} \varphi_1 = 32$ – угол наклона калибровочного графика. Тогда окончательно

$$\delta n = \frac{\Delta z}{\operatorname{tg} \varphi_1} \frac{\lambda}{l} = 2.1 \cdot 10^{-7} \Delta z \quad (2)$$

2.3 Зависимость Δn от ΔP для воздуха

1. Убедились, что давление воздуха в обеих камерах куветы атмосферное. Установили сильфон в среднее положение и отсоединили первую камеру от атмосфера, перекрыв кран K_1 .
2. Изменяя давления с помощью сильфона и совмещая нулевые полосы, сняли зависимость показаний компенсатора z от перепада давлений ΔP . Мы фиксировали давление сразу же, поскольку в последствии давление падало из-за утечек. Результаты представлены в таблице 2.

Таблица 2: Зависимость показаний микрометра от давления

ΔP , мм вод ст	−800	−700	−600	−500	−400	−300	−200	−100	0
z , дел	179.5	194.5	209.5	222.5	235.5	252	265.5	280.5	297.5

ΔP , мм вод ст	100	200	300	400	500
z , дел	306.5	322.5	337.5	346.5	362.5

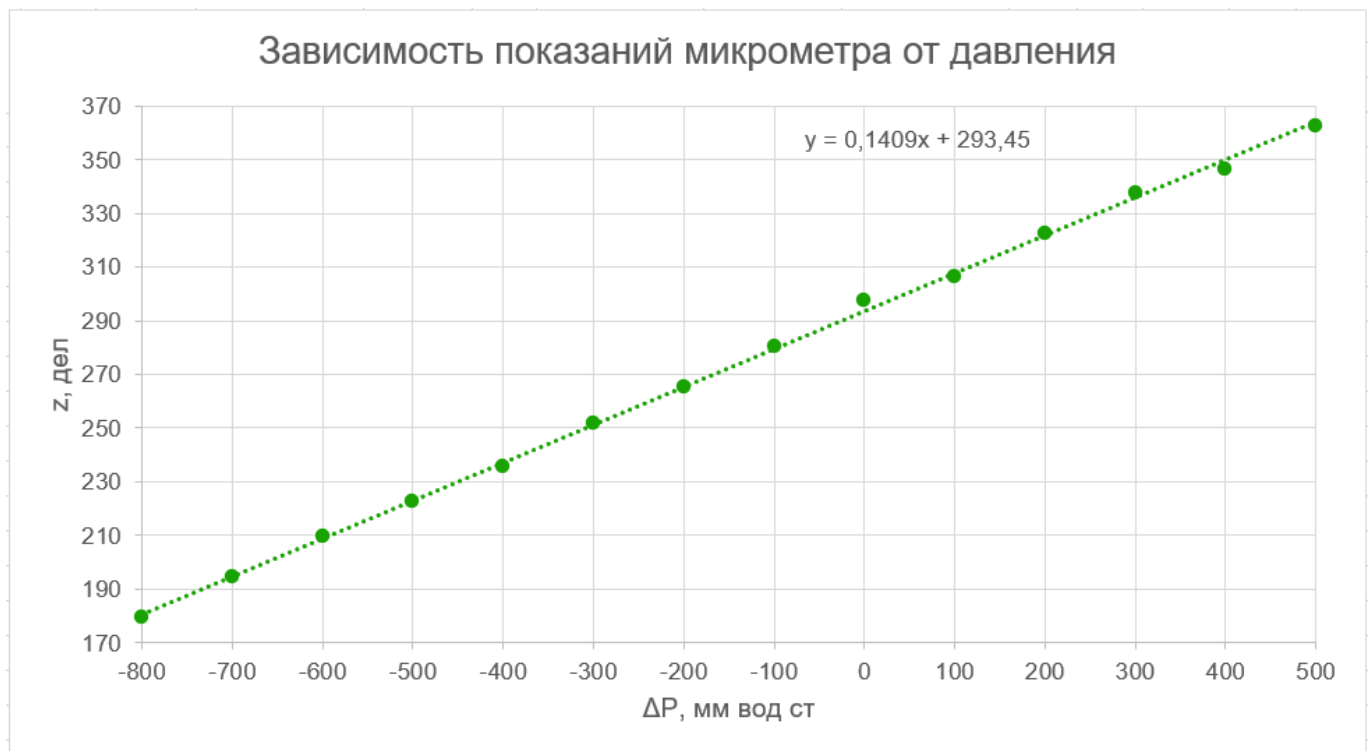


Рис. 3: Зависимость показаний микрометра от давления

Угол наклона графика $\operatorname{tg} \varphi_2 = 0.14 \frac{\text{дел}}{\text{мм. вод. ст.}}$

3. Определим среднюю поляризуемость молекулы воздуха:

$$\delta n = \frac{2\pi\alpha}{k_B T} \Delta P \quad (3)$$

$$\alpha = \frac{\delta n k_B T}{2\pi \Delta P} = \frac{\Delta z \lambda}{\operatorname{tg} \varphi_1 l} \frac{k_B T}{2\pi \Delta P} = \frac{\operatorname{tg} \varphi_2}{\operatorname{tg} \varphi_1} \frac{\lambda k_B T}{2\pi l} = 192 \cdot 10^{-32} \quad (4)$$

4. Определим показатель преломления воздуха по формуле

$$n_0 = 1 + 2\pi\alpha \frac{P_0}{kT_0} = 1.00032 \quad (5)$$

Для $T = 292.6$ К и $P = 99.4$ кПа

$$n = 1 + \frac{(n_0 - 1)T_0 P}{TP_0} = 1.000297 \quad (6)$$

5. Во вторую кювету запустим углекислый газ. Сразу после этого набежит разность хода, которая компенсируется поднятием компенсатора на 190 мкм.

Так как $n_2 - n_1 = \delta n$, а δn была определена по формуле через калибровочный график, $\delta n = \Delta z \frac{\lambda}{l \operatorname{tg} \varphi_1} = 0.995 \Delta z$

Поэтому

$$n_{CO_2} = n + 0.995 \Delta z = 1.000303 + 0.000179 = 1.000482 \pm 0.000032 \quad (7)$$

2.4 Сравнение показателей преломления воздуха и углекислого газа при атмосферном давлении

1. Соединили первую камеру кюветы с атмосферой, открыв кран K_1 , и отключили манометр, закрыв кран K_2 . Заполнили углекислым газом камеру с открытым концом.
2. Совместили нулевые полосы. Картина сдвинулась более чем на 25 полос, что говорит о том, что камера в большей мере заполнена углекислым газом, воздуха в ней почти нет.
3. Сняли зависимость равновесного положения компенсатора от времени (таблица 3), раз в минуту совмещая нулевые полосы, и оценили время установления равновесия $\tau \approx 10$ мин.
4. Определили температуру $T = 19.6$ °C и давление $P = 99.4$ кПа по показаниям лабораторного термометра и барометра.

t , мин	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
z	10.245	9.275	8.565	8.15	7.475	6.165	5.885	5.625	5.415	5.275

Таблица 3: Результаты измерений

3 Подведение итогов и выводы

В ходе данной лабораторной работы мы исследовали изменение показателя преломления воздуха при изменении давления. Для этого мы настроили установку, провели калибровку компенсатора и сняли зависимость показателя преломления от давления. Так же мы определили разность показателей преломления воздуха и углекислого газа при атмосферном давлении. По результатам измерений мы рассчитали показатели преломления соответствующих газов при нормальных условиях:

$$n_{\text{возд}} = (\pm) (\varepsilon = \%)$$

$$n_{CO_2} = (\pm) (\varepsilon = \%)$$