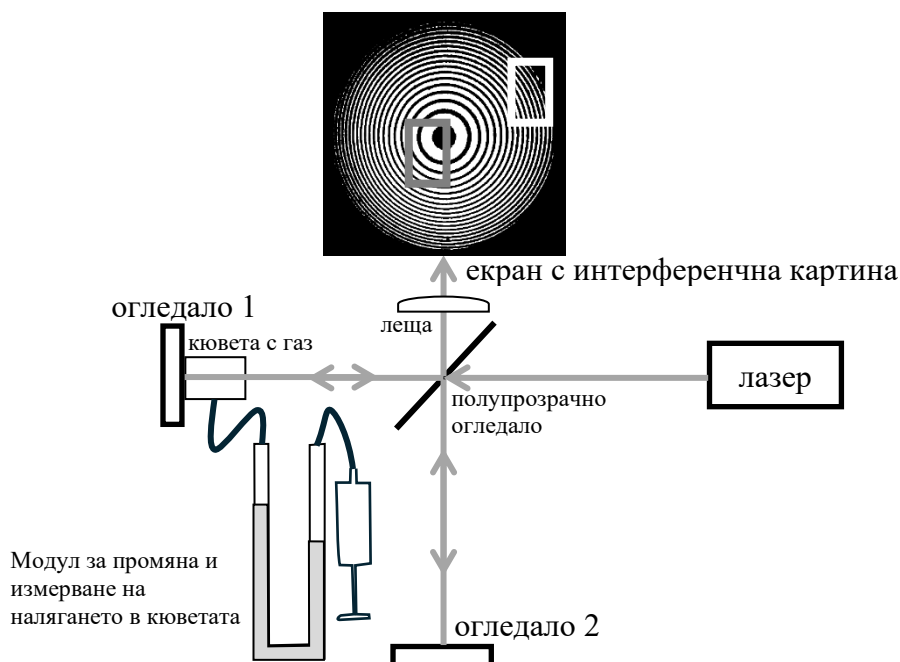


МИНИСТЕРСТВО НА ОБРАЗОВАНИЕТО И НАУКАТА
НАЦИОНАЛНА ОЛИМПИАДА ПО ФИЗИКА
НАЦИОНАЛЕН КРЪГ, 26 април 2026 г., Плевен
Тема 10.-12. клас (четвърта състезателна група)
Експериментален кръг - Задача 1

Теоретична част

Целта в настоящата задача е с интерферометъра на Майкелсън да се определи показателя на пречупване на въздуха при зададени температура и налягане $n_{0,760}$ като предварително се определи дължината на светлинната вълна с дифракционна решетка.

Най-общо казано, интерферометърът на Майкелсън се състои от монохроматичен източник на светлина (например лазер), полупрозрачно (ПП) огледало, две огледала и екран подредени в схема с две рамена, подобна на показаната на фигурата. Участъкът от ПП огледало до огледало 1 е едното рамо, а от ПП огледало до огледало 2 другото рамо. Лещата служи единствено за увеличаване на интерференчната картина, а модулът за промяна и измерване на налягането на въздуха в кюветата е за конкретното измерване чрез интерферометъра.



Част от светлината отива до огледало 1, отразява се от него и отново се отразява от ПП огледало към екрана. Друга част от светлината отива до огледало 2, отразява се от него и преминава през ПП огледало към екрана. Отиващите към екрана светлинни вълни се сумират и могат да интерферират конструктивно или деструктивно. Ако разликата в оптичните пътища на лъчите в двете рамена ($s_2 - s_1$) е четно число полуълни, ще се наблюдава максимум, а ако е нечетно число полуълни ще се наблюдава минимум. На практика, т.к. лазерният лъч има малка разходимост, типичната интерференчна картина, която се наблюдава е, както представената на фигурата. Вие ще наблюдавате части от нея, подобни на частите, оградени с правоъгълници, на фигурата. В интерференчната картина се виждат редуващи се максимуми и минимума, периода на които намалява от центъра към периферията на кръга.

Оптичният път на светлината s при изминаването на път x през някаква среда за време t е пътят s , който би изминала светлина за същото време, ако се движи във вакуум $s = ct = c(x/v) = nx$, т.е. оптичният път е геометричният път умножен по показателя на пречупване на средата, в която се движи светлината.

При промяна на разликата в оптичните пътища $\Delta(s_2 - s_1)$ в рамената на интерферометъра интерференчната картина се променя, като промяна с една дължина на вълната, води до

заместването на един максимум със съседен на него. Ако в едно от рамената на уреда се промени или x , или n , или и двете, ще се промени и разликата в оптичните пътища на двата лъча.

За газ зависимостта на показателят му на пречупване – n от налягането – p се дава с изразът:

$$n = 1 + Cp \quad (1)$$

където ако температурата на газа не се променя C е константа (дадена по-долу).

Промяната на показателя на пречупване води до промяна в оптичния път а от там и на интерференчната картина. Зависимостта на броят преминали максимуми Δk в една точка от интерференчната картина от промяната на показателя на пречупване - n се дава със следният израз:

$$\Delta k \lambda = (n - n_0) 2L \quad (2)$$

където означенията са: n_0 – начална стойност на показателя на пречупване на въздуха (при налягането и температурата в работното помещение), λ – дължина на светлинната вълна, L – дължина на съда в който се променя налягането, а множителят 2 е заради двойното минаване на лъча през кюветата (съда с газ).

При нормално падане на лъч към дифракционна решетка, зависимостта между преминалия дифракционен порядък - k и ъгълът му на отклонение – α_k спрямо нормалата към решетката е:

$$m\lambda = b \sin \alpha_m, \quad (3)$$

където b е периода на дифракционната решетка.

Уреди и материали

за интерферометъра:

- Работна плоскост $52 \times 38 \times 2$ cm 1 бр.
- Огледала на стойки (прикрепването е с по 2 пластмасови щипки) 2 бр.
- Полупрозрачно огледало на стойка (прикрепването е с метална щипка-32 mm) 1 бр.
- Масичка с 3 винтови крачета за фина нивелация 1 бр.
- Отвертка за фина нивелация 1 бр.
- Лупа на стойка (прикрепването е с метална щипка-25 mm) 1 бр.
- Лазер на стойка (с подвижно магнитно прикрепване към стойката) 1 бр.
- Свързващи проводници с накрайници тип крокодил 2 бр.
- Батерия - 9V..... 1 бр.
- Екран с подвижни точки, на стойка (прикрепването е с метална щипка-25 mm) 1 бр.
- Кювета с въздух (прикрепването ѝ е с две метални щипки към огледало 1)..... 1 бр.
- Модул за промяна и измерване на налягането в кюветата (включващ: манометър на стойка, спринцовка и свързващи маркучи..... 1 бр.

допълнителни:

- Дифракционна решетка от $\frac{1}{4}$ компактдиск, на стойка (прикрепването е с метална щипка - 50 mm) 1 бр.
- Линия-екран на стойка (прикрепването е с метална щипка-25 mm) 1 бр.
- Линия 1 бр.
- Маркер..... 1 бр.
- Милиметрова хартия..... 1 л.

Указания:

по отношение на интерференчната картина:

- Лазерът загрява за около 2 минути, през което време се наблюдава нестабилна интерференчна картина.
- В реализираната конфигурация на интерферометъра се наблюдава малка част от цялата интерференчна картина, подобна на частите оградени с малки правоъгълници в интерференчната картина на фигурата. Каква част от цялата картина ще се наблюдава, зависи от фината настройка: малки промени в позициите на ПП огледало и огледало 2 показват различна част от цялата интерференчна картина. Това позволява да се работи с максимуми с по-голям или по-малък период.
- На екрана ще наблюдавате две двойки лазерни петна, т.к. се получават отражения и от двете стени на ПП огледало, но само от по-ярките петна се получава интерференчната картина. По-ярките петна са от полупрозрачен слой нанесен на едната стена на ПП огледало.

за настройката на интерферометъра на Майкелсън:

- По време на настройките внимавайте с лазера ! Не гледайте към изхода на лазера ! Не гледайте в равнината на движение на лазерното лъчение !
- Груба схема на подредбата на елементите на интерферометъра е нарисувана на работната плоскост.
- Както ще се убедите, уредът е много чувствителен на вибрации, нестабилни елементи, и дори леко притискане на работната маса и трябва да се работи внимателно. По тази причина при подредбата на елементите на уреда трябва да се избягва стойките на елементите да стъпват върху неравности, за да не се създават нестабилности в уреда. Докато правите самите измервания, е добре по работната маса да пипате, само спринцовката и да маркирате с маркер нивото на водата в манометъра. При позициониране на огледало се убедете, че долният ръб на огледалото лежи стабилно на масата, като притиснете самото огледало към работната плоскост ! Малки нестабилности в елементите могат да се премахнат, чрез почукване по работната плоскост.
- При настройките хващайте с пръсти оптичните елементи странично, не за повърхностите където трябва да минава светлината.
- Раменете на уреда не трябва да се различават по дължина повече от ± 2 cm.
- (1) Първо се настройва отразеният лъч от огледало 1 да се връща отново към изхода на лазера, а също така да преминава и през кюветата с въздух. Тези настройки се правят лесно чрез въртене на огледало 1 и насочване на лазера. Лазерът има подвижно магнитно прикрепване към стойката.
- (2) След това се позиционира ПП огледало, като отразеният към екрана лъч трябва да е приблизително перпендикулярен на излизащият от лазера лъч и приблизително на неговото ниво, което лесно се настройва чрез въртене на ПП огледало върху масичката с 3 крачета и нейното нивелиране с отвертката. Екранът може да стои на работната маса извън работната плоскост, ако е нужен по-голям образ на интерференчната картина.
- (3) След това се позиционира огледало 2 така, че да отрази съответния лъч към екрана. Груба настройка за припокриване на двете по-ярки лазерни петна на екрана се постига лесно чрез въртене на огледало 2 и нивелиране на масичката с 3 крачета с отвертката.
- (4) Накрая се поставя лещата между екрана и ПП огледало. Сега може да се прави фината настройка за получаване на стабилна интерференчна картина чрез съвсем малко движение на огледало 2 и съвсем малка нивелация на ПП огледало с някой от винтовете на масичката с 3 крачета. Тази фина настройка определя каква част от интерференчната картина се вижда.
- (5) Настройката на интерферометъра е постигната, ако при вкарване/изкарване на буталото на спринцовката, се наблюдава плавно движение на максимумите в една/и

обратната ѝ посока. В противен случай, внимателно се променя фината настройка на уреда.

- (6) Важно е да не се разместят елементите от настройка (1), докато се правят следващите настройки, иначе трябва да се започне отначало настройването.

по отношение на манометъра:

- Разлика на водните стълбове $\Delta h = 13.6 \text{ mm}$ отговарят на $\Delta p = 1 \text{ mm Hg}$ стълб.
- Внимателно може да отпушвате манометъра към атмосферно налягане чрез прозрачните преходници между манометъра и черните маркучи.
- Промяна на налягането в кюветата може да правите чрез спринцовката.

Необходими величини и формули:

- Приемете, че температурата при която работите е $t_0 = 25^\circ\text{C} \pm 2\%$
- Разстоянието между пътеките на 80 минутен CD-ROM е $b = 1.5\mu\text{m} \pm 3\%$
- Дължина на кюветата $L = 0.08 \text{ m} \pm 5\%$
- Константата С отговаря на:

$$C = \frac{n_{0,760} - 1}{1 + \frac{t}{273.15}} \frac{1}{760} \quad (4)$$

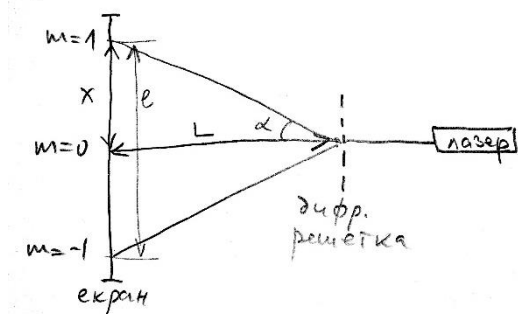
където $n_{0,760}$ е показателя на пречупване при $t' = 0^\circ\text{C}$ и при налягане $p' = 760 \text{ mmHg}$

Номерируйте страниците на беловата и черновата. Пишете четливо.

Задачи:

1. Определяне на дължината на вълната на лазера λ , чрез компактдиска и екран-линийка.

- 1.1. Начертайте схема на подредбата на елементите, която ще използвате за определяне на дължината на лазера. На схемата означете нужните величини за пресмятането на λ .** [1 т.]



- 1.2. Представете израз, с който ще пресметнете λ .**

[0.5 т.]

$$\lambda = b \frac{x}{\sqrt{x^2 + L^2}}; \quad \text{за } m=1$$

- 1.3. Направете нужното еднократно измерване с възможно по-голяма точност и представете измерените величини с грешките по подходящ начин.** [2 т.]

$$L = 290 \pm 2 \text{ mm} = 290 \text{ mm} \pm 0.7\% \quad (1 \text{ т.}) \quad l = 282 \pm 2 \text{ mm}; \quad x = \frac{l}{2}; \quad \Delta x = \frac{\Delta l}{2} \quad (1 \text{ т.})$$

$$x = 141 \pm 1 \text{ mm} = 141 \text{ mm} \pm 0.7\%$$

- 1.4. Опишете накратко какви мерки взехте за коректно подреждане на елементите и за по-голяма точност на резултата от еднократното измерване.** [1 т.]

- 1) за коректно измерване на x , екрана трябва да е перпендикулярен на лъча. Това се осигурява, като отразеният от линейката-екран лъч, се връща в лазера. **(0.25 т.)**
- 2) за да е нормално падането върху дифракционната решетка, отразеният от нея лъч също трябва да се връща в лазера. **(0.25 т.)**
- 3) за по-голяма точност на измерванията, екрана е максимално далече от дифракционната решетка, така че измерваните разстояния, да са с минимални относителни грешки. **(0.5 т.)**

1.5. Пресметнете дължината на вълната на лазера λ . Приемете, че сте я определили с точност 5% и я представете по подходящ начин с абсолютната и относителната процентна грешки по подходящ начин. **[0.5 т.]**

$$\lambda = b \frac{x}{\sqrt{x^2 + L^2}} = 1.5 \mu m \frac{141}{\sqrt{141^2 + 290^2}} = 1.5 \mu m \times 0.437 = 0.65589 \mu m \quad (0.25 \text{ т.})$$

$$\lambda = 656 nm \pm 5\% = 656 \pm 33 nm \quad (0.25 \text{ т.})$$

2. Изследване на $\Delta k(\Delta p)$ - зависимостта на броя преминали максимуми - Δk в точка от интерференчната картина от промяната на налягането на газа - Δp . Определяне на показателя на пречупване на въздуха $n_{0,760}$.

2.1. Представете зависимостта $\Delta k(\Delta p)$ по подходящ начин, така че да е права линия, и от нея да може да се определи показателят на пречупване $n_{0,760}$. **[2 т.]**

От (1) $n = 1 + C\rho$ и предвид че $n_0 = 1 + C\rho_0$ следва че $\Delta n = C\Delta\rho$. Вземайки предвид (2) $\Delta k\lambda = \Delta n 2L$ получаваме:

$$\Delta k = C \frac{2L}{\lambda} \Delta p$$

Зависимостта е линейна: $y = ax$,

като сме означили: $y = \Delta k$; $x = \Delta p$; $a = C \frac{2L}{\lambda}$;

от наклона се определя константата C а от нея и $n_{0,760}$

2.2. Представете израз, чрез който от резултатите от зад.2.1 ще определите показателят на пречупване на въздуха $n_{0,760}$. **[1 т.]**

От наклона a определяме константата C :

$$C = a \frac{\lambda}{2L}$$

а от ур.(4) и като знаем стайната температура получаваме $n_{0,760}$:

$$n_{0,760} = C \left(1 + \frac{t}{273.15} \right) 760 + 1$$

2.3. След настройване на интерферометъра на Майкелсън получите експериментално зависимостта на $\Delta k(\Delta p)$ и я представете в табличен вид. Опишете накратко всяка величина представена в таблицата. **[4 т.]**

Δk	h_{left}, mm	h_{right}, mm	$\Delta h, mm$	$\Delta p, mmHg$
0	150	150	0	0,0
2	130	170	40	2,9
4	122	188	66	4,9
6	105	205	100	7,4
8	88	222	134	9,9
10	72	238	166	12,2
12	56	254	198	14,6

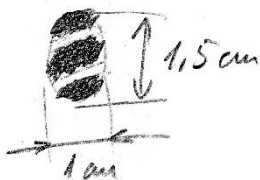
При 6 и повече измервания **(3.5 т.)**

Δk - броя преминали максимуми в точка от интерференчната картина.

Δp - промяна на налягането на газа в кюветата.

$\Delta h = h_{right} - h_{left}$ височина на водния стълб в манометъра. (0.5 т.)

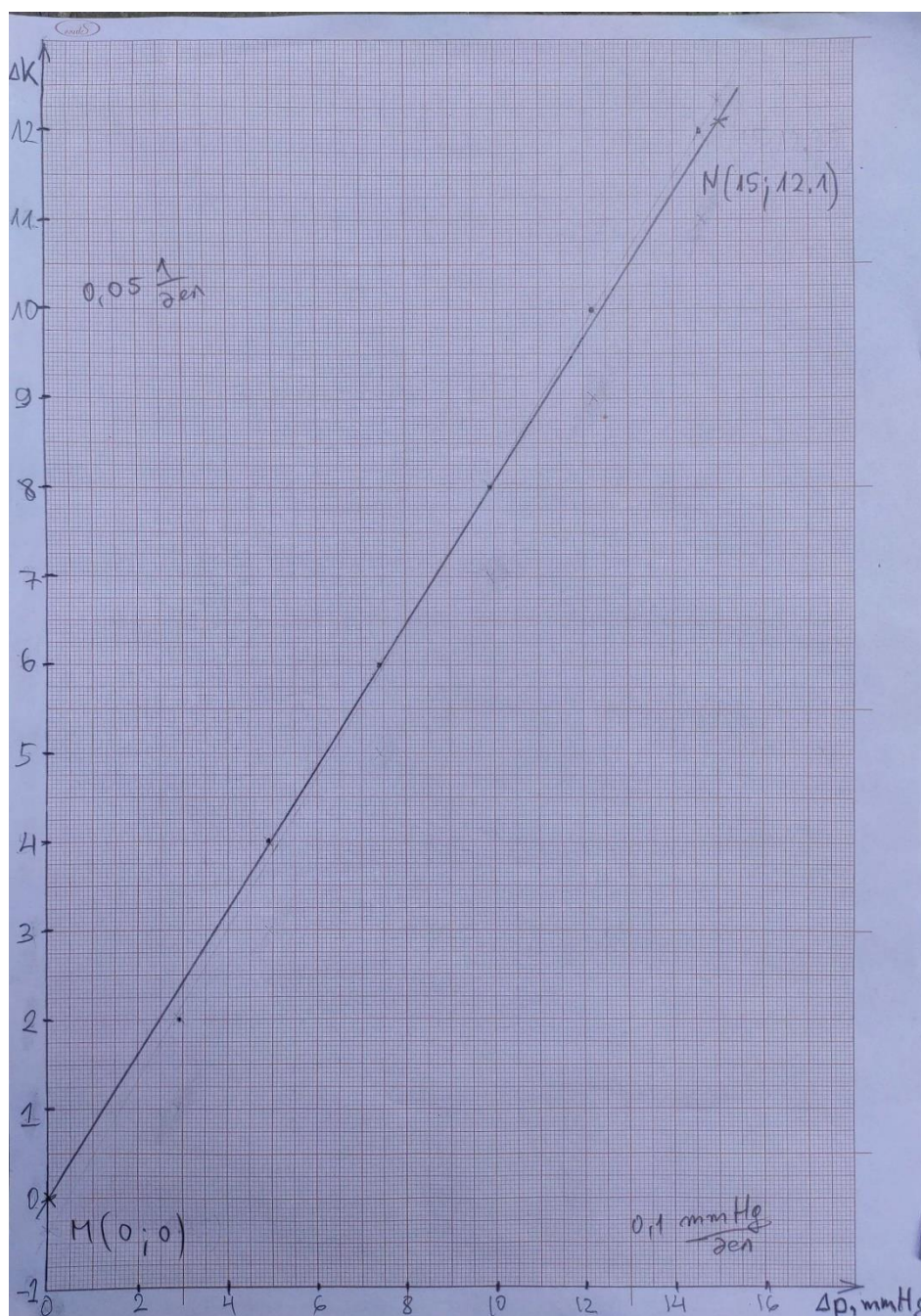
2.4. Начертайте схематично образа на използваната част от интерференчната картина, като означите приблизителните ѝ размери. Обосновете как избрахте каква част от интерференчната картина ще използвате. [1 т.]



(0.5 т.)

Интерференчната картина при измерването е избрана така, че да е плавно променяща се при промяна на налягането в кюветата, и освен това да е с достатъчно голям период за лесно броене на преминаващите максимуми. (0.5 т.)

2.5. Използвайки експерименталните данни, представете линейната зависимост от задача 2.1. графично. [3 т.]



Точки за графиката се дават ако:

- използвана е цялата площ на листа милиметрова хартия; **(0.5 т.)**
- по осите на графиката са означени съответните величини; **(0.5 т.)**
- отбелязани са мерните единици на величините; **(0.5 т.)**
- нанесени са 6 и повече точки от табличните данни; **(1.5 т.)**

2.6. Определете коефициента/коефициентите на линейната зависимост от зад.2.5, съответната абсолютна грешка и относителна процентна грешка. [2 т.]

$$a = \frac{l_y}{l_x} = \frac{12.1-0}{15-0} = \frac{12.1}{15} = 0.8066 \text{ mmHg}^{-1} \text{ (0.5 т.)}$$

$$\frac{\Delta a}{a} = \frac{\Delta l_x}{l_x} + \frac{\Delta l_y}{l_y} = \frac{0.1}{15} + \frac{0.05}{12.1} = 0.0066 + 0.0041 \approx 0.0107 = 1.1\% \text{ (0.5 т.)}$$

за Δl са взети съответните на 1 mm от графиката.

$$\Delta a = \left(\frac{\Delta a}{a}\right) a = 0.011 \times 0.8066 \approx 0.009 \text{ mmHg}^{-1} \text{ (0.5 т.)}$$

$$a = 0.807 \pm 0.009 \text{ mmHg}^{-1} = 0.807 \text{ mmHg}^{-1} \pm 1.1\% \text{ (0.5 т.)}$$

2.7. Като ползвате резултатите от т.2.2 и т.2.6 определете стойностите на C и $n_{0,760}$. Представете ги с оценените им абсолютна и относителна процентна грешки по подходящ начин. [2 т.]

От наклона a определяме константата C :

$$C = a \frac{\lambda}{2L} = 0.807 \frac{656 \times 10^{-9}}{2 \times 0.08} = 3.309 \times 10^{-6} \text{ mmHg}^{-1}$$

$$\frac{\Delta C}{C} = \frac{\Delta a}{a} + \frac{\Delta \lambda}{\lambda} + \frac{\Delta L}{L} = 1\% + 5\% + 5\% = 11\%$$

$$\Delta C = \left(\frac{\Delta C}{C}\right) C = 0.11 \times 3.309 \times 10^{-6} = 0.4 \times 10^{-6} \text{ mmHg}^{-1}$$

$$C = (3.3 \pm 0.4) \times 10^{-6} \text{ mmHg}^{-1} = 3.3 \times 10^{-6} \text{ mmHg}^{-1} \pm 11\% \text{ (1 т.)}$$

а от ур.(4) получаваме $n_{0,760}$:

$$\begin{aligned} n_{0,760} &= C \left(1 + \frac{t}{273.15}\right) 760 + 1 \\ n_{0,760} &= C \left(1 + \frac{25}{273.15}\right) 760 + 1 = \\ &= C \times 829.55 + 1 = \\ &= 0.002738 + 1 \\ n_{0,760} &= 1.002738 \end{aligned}$$

Ако приемем че само t и C имат грешки при измерването и разгледаме израза, то

$$n_{0,760} = C \left(1 + \frac{t}{273.15}\right) 760 + 1$$

като

$$n_{0,760} = C \cdot 760 + \frac{C \cdot 760}{273.15} t + 1 = p + q + 1$$

$$\Delta p = 760 \cdot \Delta C = 760 \times 0.4 \times 10^{-6} = 304 \times 10^{-6}$$

$$\frac{\Delta q}{q} = \frac{\Delta t}{t} + \frac{\Delta C}{C} = 2\% + 11\% = 13\%$$

$$\Delta q = \frac{\Delta q}{q} q = 0.13 \times 230 \times 10^{-6} = 30 \times 10^{-6}$$

$$\Delta n_{0,760} = \Delta p + \Delta q \approx 300 \times 10^{-6}$$

$$n_{0,760} = 1.002700 \pm 0.000300 = 1.002700 \pm 0.03\% \text{ (1 т.)}$$