

УДК 539.12-164 + 539.3

Природа відстані найкращого бачення*Угрин Ю. О., Трембецький М. В.*email: a7xkol@ukr.netДрогобицький державний педагогічний університет імені Івана Франка,
кафедра загальної фізики

Досліджено причини формування відстані найкращого бачення. Показано, що в навчальних підручниках з фізики і біофізики немає вичерпного пояснення цієї величини. За допомогою обчислень для явища заломлення сферичною поверхнею непараксіальних променів доведено, що розпливчатість зображення точки на сітківці ока людини зменшується з віддаленням цієї точки від ока і практично перестає зменшуватись за відстані від ока близько 10 см. Зроблено висновок, що відстань найкращого бачення – це оптимальна відстань, яка є прийнятно малою для того, щоб була достатньою лінійна роздільна здатність і досить великою для того, щоб зображення кожної точки предмета утворювалось на сітківці від перетину параксіальних променів.

Ключові слова: відстань найкращого бачення, акомодация, лінійна роздільна здатність, кутова роздільна здатність, параксіальний промінь, непараксіальний промінь.

ВСТУП

Проблемі відстані найкращого бачення не приділяється достатньої уваги в навчальних підручниках з фізики. Дуже часто розгляд цього питання займає декілька рядків, або констатується тільки факт, що відстань найкращого бачення дорівнює приблизно 25 см [3]. Деякі автори все ж намагаються пояснити походження цієї відстані (цієї цифри), проте ці пояснення видаються нам не зовсім вичерпними. У літературі щодо цієї проблеми можна виділити три головні ідеї. Перша ідея полягає в тому, що відстань найкращого бачення сформувалася в процесі еволюції завдяки звичці розглядати предмети, що знаходяться в руках [5, 9] чи виробничій діяльності, що здійснюється напівзгнутими руками [1]. Друга ідея полягає в тому, що для розгляду предметів на цій відстані око не напружується [2, 7]. Найбільш адекватно, на нашу думку, відображає дійсність твердження, що відстань найкращого бачення обмежена знизу неможливістю акомодатії ока на предмети, які розташовані щодо ока ближче певної відстані [4, 8]. Ця неможливість полягає в тому, що кришталик ока не здатний збільшити свою кривизну опуклості достатньо, щоб зображення предметів ближчих за цю відстань потрапляли на сітківку ока.

Ми маємо намір показати, що в згаданій вище здатності ока зменшувати свою фокусну відстань менше певної величини насправ-

ді немає потреби, тобто, якщо б кришталик і міг ще зменшувати свою фокусну відстань, це не привело б до покращення бачення деталей предмета, а обмеження на розглядання предметів на занадто близькій відстані до ока накладає сама природа заломлення на сферичній поверхні.

1. ФІЗИЧНА МОДЕЛЬ

Припустимо, що існує оптимальна відстань до предмета, на якій око добре розрізняє всі його деталі, тобто існує відстань найкращого бачення. Нехай предмет знаходиться на відстані найкращого бачення. Поміркуємо, які проблеми будуть виникати якщо предмет віддаляти від ока на відстань більшу за відстань найкращого бачення, і які якщо предмет наближати до ока. Проблема, яка виникає з віддаленням предмета від ока, очевидна – це зменшення лінійної роздільної здатності. Відомо, що для ока, як і для будь-якого об'єктива існує мінімальний граничний кут зору α_m на дві близькі точки, за якого вони сприймаються роздільно [3]:

$$\alpha_m = 1,22 \frac{\lambda}{d},$$

де λ – довжина хвилі світла, d – діаметр об'єктива (зіниці ока).

Для ока цей кут становить $1'$, і він є сталою величиною, незалежною від відстані від ока до цих точок (від ока до предмета).

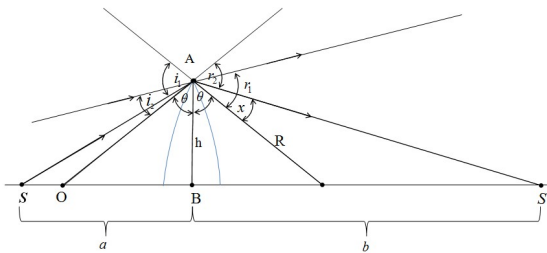
Тобто кутова роздільна здатність ока є сталою величиною, незалежною від відстані a від ока до предмета. Проте, гранична відстань між двома точками, очевидно, залежить від цієї відстані, і що далі від ока, то вона ставатиме все більшою, тобто здатність розрізняти дві близькі точки погіршуватиметься.

Отже, з віддаленням предмета від ока зменшуватиметься його лінійна роздільна здатність.

Яка ж проблема виникає з наближенням предмета до ока? На перший погляд здається, що збільшення при цьому роздільної здатності приведе до покращення бачення. Проте, при цьому зростає кут між падаючим променем та головною оптичною віссю ока, тобто промінь стає все більш непараксіальним, а точніше, крім параксіальних променів у формуванні зображення все більше беруть участь непараксіальні промені. А позаяк непараксіальні промені заломлюються лінзою сильніше, ніж параксіальні, то дійсне зображення точки на екрані, яким є сітківка ока, є вже не точкою, а відрізком – таким чином, зображення предмета розпливається. Покажемо це за допомогою обчислень.

2. РЕЗУЛЬТАТИ ОБЧИСЛЕНЬ

Для цього виведемо формулу лінзи для непараксіального променя, який падає на лінзу під кутом α до її головної оптичної осі (мал. 1).



Мал. 1. Заломлення непараксіального променя лінзою. a – відстань від лінзи до точки – предмета, b – відстань від лінзи до зображення, h – радіус лінзи, R – радіус кривизни поверхонь лінзи, i_1, r_1 – кути падіння та заломлення променя на першу заломлювальну поверхню, i_2, r_2 – кути падіння та заломлення променя на другу заломлювальну поверхню, θ – кут між нормаллю до заломлювальної поверхні та нормаллю до головної оптичної осі, x – кут між заломленим променем і нормаллю до першої заломлювальної поверхні.

Згідно з законом заломлення, застосованим до I і II заломлювальних поверхонь лінзи маємо:

$$\frac{\sin i_1}{\sin r_1} = n, \quad \frac{\sin i_2}{\sin r_2} = \frac{1}{n},$$

де n – показник заломлення лінзи.

З малюнка 1, а також за теоремою синусів, застосованою до $\triangle SOA$, маємо:

$$i + 2\theta + \sin\left(\frac{a-R}{R}\sin\alpha\right) = \pi,$$

$$r_2 + 2\theta + x = \pi, \quad \theta = \arctg \frac{R}{h}, \quad \alpha = \arctg \frac{h}{a}.$$

З останніх шести формул та трикутника ABS' дістаємо формулу тонкої двоопуклої лінзи для непараксіального променя, який проходить під кутом α до головної оптичної осі:

$$b = -atg \arctg \left[\arctg \left(\frac{R}{atg\alpha} \right) + \arcsin \left(n \sin \left(2 \arctg \left(\frac{R}{atg\alpha} \right) + \arcsin \left(\frac{1}{n} \sin \left(2 \arctg \left(\frac{R}{atg\alpha} \right) + \arcsin \left(\frac{a-R}{R} \sin \alpha \right) \right) \right) \right) \right) \right]$$

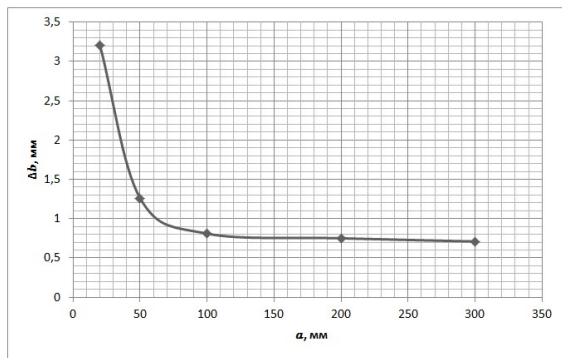
Застосуємо цю формулу для обчислення відстані до зображення точок, які знаходяться на головній оптичній осі ока на різних відстанях від ока. Оптичну систему ока змоделюємо збіркою лінзою (рогівка, кришталік та скловидне тіло) та екраном (сітківка), який знаходиться на відстані 2,5 см від лінзи [3]. Максимальний кут α між головною оптичною віссю і падаючим променем задається радіусом входного отвору (зіницею ока) h . У таблиці показані результати обчислень відстані до зображення для параксіального (при $h=0$) і непараксіального (при $h=2$ мм) променів (різний радіус кривизни R лінзи моделює акомодацию ока, за якої зображення віддаленого на будь-яку відстань предмета повинно потрапляти на сітківку ока, яка знаходиться на відстані 25 мм від лінзи).

Таблиця. a – відстань від предмета до ока, R – радіус кривизни лінзи, яка моделює заломлювальну систему ока, b – відстань від лінзи до зображення (сітківки), h – радіус лінзи (діафрагми), Δb – розпливчатість зображення точки.

a (мм)	R (мм)	b (мм)		Δb (мм)
		для $h \rightarrow 0$	для $h = 2$ мм	
20	6,67	25	21,79	3,21
50	10,0	25	23,74	1,26
100	12,0	25	24,19	0,81
200	13,3	25	24,25	0,75
300	13,8	25	24,29	0,71

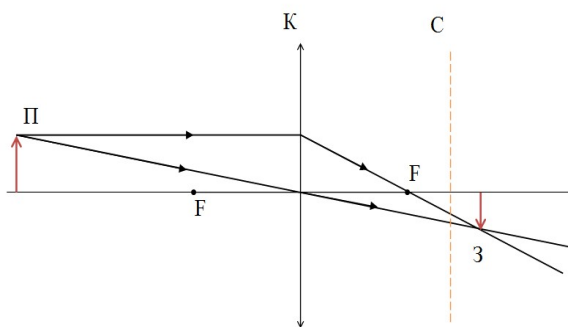
З цієї таблиці видно, що з наближенням до ока, зображення точки все більше розпливається, тобто різниця $b(h=0) - b(h=2\text{мм}) \equiv \Delta b$ стає все більшою.

Залежність Δb від відстані від точки до ока показана на мал. 2, з якого видно, що, починаючи з відстані a , що дорівнює приблизно 10 см, розпливчатість зображення практично не зменшується.



Мал. 2. Залежність розпливчатості Δb зображення точки від відстані a цієї точки від ока.

Ця відстань і є відстанню найкращого бачення. Справді, у дітей саме відстань близько 10 см є відстанню найкращого бачення. Очевидно, що з віком вона поступово зростає через втрату еластичності кришталика, який залишається в розтягнутому стані, незважаючи на напруження м'язів, тобто, має надто великий радіус кривизни (надто велику фокусну відстань), і зображення близьких предметів не потрапляють за сітківку ока (мал. 3).



Мал. 3. Моделювання дальозорості. П – предмет, К – кришталик, З – зображення предмета, С – сітківка, F – фокуси. Кришталик ока не здатний зменшити свою фокусну відстань для того, щоб зображення потрапило на сітківку ока.

ВИСНОВКИ

Таким чином, відстань найкращого бачення – це оптимальна відстань, яка є достатньо малою для того, щоб була ще добра лінійна роздільна здатність і достатньо великою для того, щоб зображення формувалося параксіальними променями. Існування цієї відстані зумовлено самою природою заломлення світла на сферичній поверхні та природою дифракції на круглому отворі, яка обмежує роздільну здатність ока. Очевидно, що ця відстань існує навіть для ідеального ока, тобто такого, яке здатне до акомодатії на будь-яку малу відстань. Тому не акомодатійна здатність обмежує знизу відстань найкращого бачення, а саме відстань найкращого бачення обмежує акомодатійну здатність. І в акомодатії на відстань менше 10 см просто немає потреби і ця здатність в людського ока не виникла як це є в природі, коли певні функції живого організму в процесі еволюції не розвиваються чи відповідають за відсутністю в цьому потреби.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- [1] Бушок Г.Ф., Венгер Є.Ф. (2003). Курс фізики у 3 книгах. Книга 3. Оптика. Фізика атома і атомного ядра. / К: Вища школа, 2003. – 311 с.
- [2] Ємчик Л. Ф., Кміт Я. Медична і біологічна фізика: підручник. / Л.: Світ, 2003. – 591 с.
- [3] Кучерук І. М., Горбачук І. Т. Загальний курс фізики: У 3т.: Навч. посіб. для студ. вищ. техн. і пед. закл. освіти. Т. 3. Оптика. Квантова фізика / За ред. І. М. Кучерука. – К.: Техніка, 1999. – 520 с.
- [4] Ohanian H. C. Physics. / New-York – London: W.W.Norton & Company, 1985. – 1012 p.
- [5] Ремизов А. Н. Медицинская и биологическая физика: Учеб. для вузов / А. Н. Ремизов, А. Г. Максина, А. Я. Потапенко. – 4-е изд., перераб. и дополн. – М.: Дрофа, 2003. – 560 с.
- [6] Сивухин Д.В. Общий курс физики. Учеб. пособ.: Для вузов. В 5 т. Т. IV. Оптика. – 3-е изд., стер. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2005. – 292 с.
- [7] Тиманюк В. А., Животова Е. Н. Биофизика: учебник для студ. вузов. – Х.: НФАУ; Золотые страницы, 2003. – 704с.
- [8] Tipler P. A. Physics. / New-York: Worth Publisher Incorporation, 1982. – 1078 p.
- [9] Швець Є. Я., Небеснюк О. Ю., Ніконова З. А., Ніконова А. О. Біофізика. Навч. посібн. / Запоріжжя. – Видавництво ЗДІА, 2008. – 306 с.