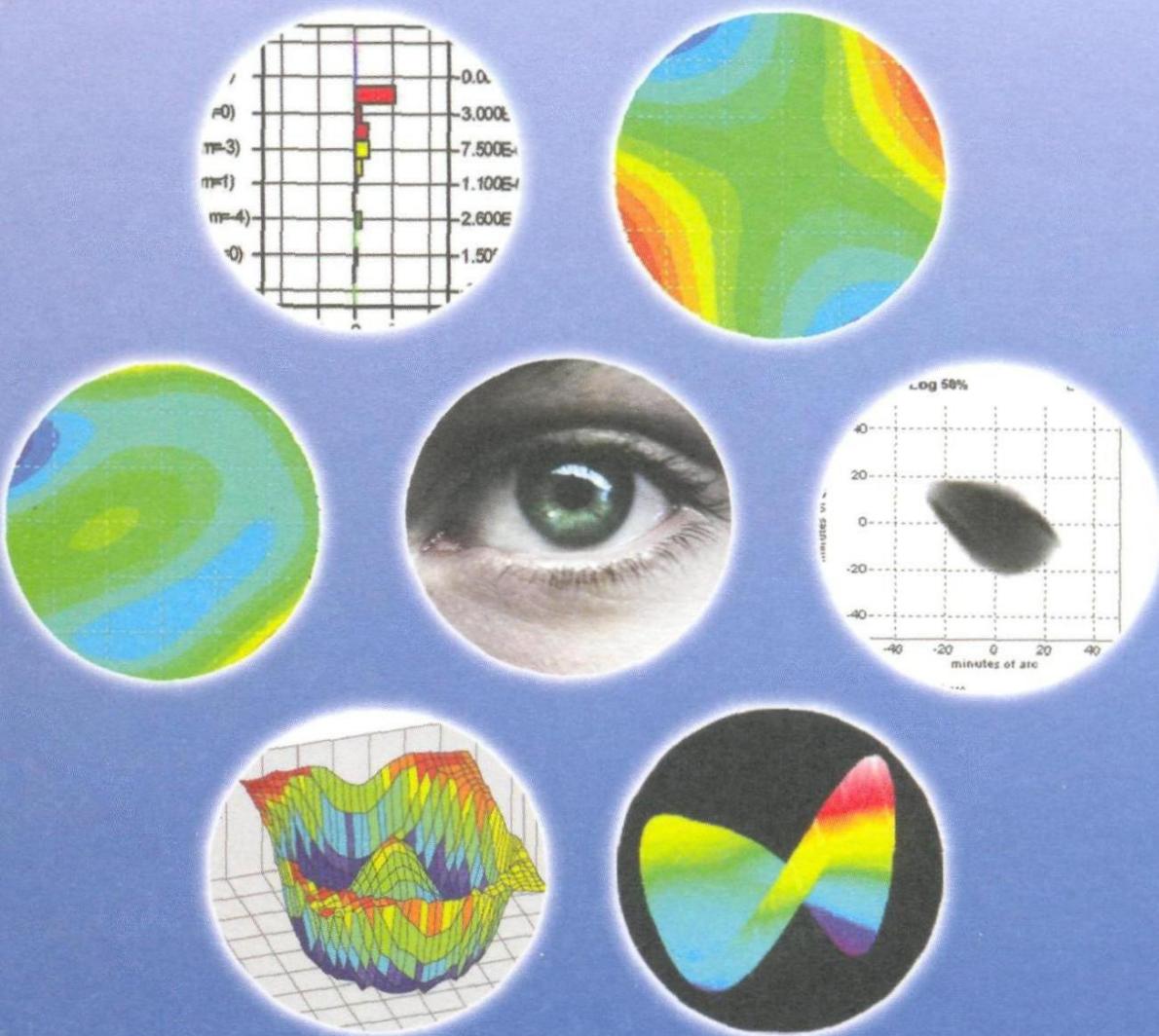


Чиж І.Г., Тимчик Г.С.  
Шиша Т.О., Афончина Н.Б.

# АБЕРОМЕТРІЯ ОПТИЧНОЇ СИСТЕМИ ОКА ЛЮДИНИ





**Чиж Ігор Генріхович** – доктор технічних наук, професор, професор кафедри оптичних та оптико-електронних приладів НТУУ «Київський політехнічний інститут». Автор понад 150 наукових праць. Провідний фахівець в галузі теорії та проектування оптичних систем оптичних, оптико-електронних та офтальмологічних приладів.



**Тимчик Григорій Семенович** – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри виробництва приладів НТУУ "КПІ". Автор понад 360 наукових праць, у тому числі 10 монографій, 8 підручників. Провідний фахівець у галузі лазерних оптико-електронних систем та технологій їх виробництва.



**Шиша Тетяна Олександрівна** – молодший науковий співробітник НТУУ "КПІ". Закінчила НТУУ "КПІ" за спеціальністю «Медичні прилади і системи». Автор понад 10 наукових праць з тематики створення моделей аберраційної оптичної системи ока для калібрування офтальмологічних аберометрів.



**Афончина Наталія Борисівна** – молодший науковий співробітник НТУУ "КПІ". Закінчила НТУУ "КПІ" за спеціальністю «Лазерна та оптоелектронна техніка». Автор понад 10 наукових праць з тематики створення офтальмологічних аберометрів та рефрактометрів.

Міністерство освіти і науки, молоді та спорту України

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут»

## Аберометрія оптичної системи ока людини

Монографія

Рекомендовано Вченого радою НТУУ «КПІ»

Київ  
НТУУ «КПІ»  
2013

<b>Вступ</b> .....	6
--------------------	---

<b>1. Зоровий орган людини</b> .....	8
--------------------------------------	---

1.1. Структура зорового аналізатора.....	8
--	---

1.2. Загальна будова ока людини.....	9
--------------------------------------	---

1.3. Сітківка.....	12
--------------------	----

1.4. Оптична система ока.....	18
-------------------------------	----

1.4.1. Еволюція даних про конструктивні параметри оптичної системи ока.....	18
---	----

1.4.2. Сучасні моделі схематичного ока.....	21
---	----

1.4.3. Усереднені значення та діапазони величин параметрів оптичної системи ока.....	23
--	----

<b>2. Показники якості зображень, сформованих на сітківці оптичного системою ока</b> .....	24
--	----

2.1. Гострота зору.....	24
-------------------------	----

2.2. Параметри та характеристики якості зображень на сітківці..	26
---	----

2.2.1. Функція розсіювання точки (ФРТ).....	26
---	----

2.2.2. Число Штреля.....	31
--------------------------	----

2.2.3. Модуляційна передачальна функція оптичної системи ока.....	33
---	----

2.3. Методи визначення характеристик і параметрів якості зображень.....	38
---	----

<b>3. Математичний опис аберрацій ока</b> .....	46
---	----

3.1. Класифікація аберрацій ока.....	46
--------------------------------------	----

3.2. Математичний опис монохроматичних аберрацій ока.....	48
---	----

3.3. Аберрації нижчих степеневих порядків.....	57
--	----

3.4. Аберрації вищих степеневих порядків.....	59
---	----

3.5. Поправлені аберрації ока.....	60
------------------------------------	----

<b>4. Узагальнена математична аберраційна модель оптичної системи ока</b> .....	65
---	----

4.1. Математична модель хвильової аберрації ОС ока.....	66
---	----

4.2. Відтворення коефіцієнтів апроксимації функції $W$ за результатами аберрометрії оптичної системи ока.....	71
---	----

<b>5. Монохроматичні аберрації ока</b> .....	79
--	----

5.1. Поперечні абератії 1-го степеневого порядку .....	80
5.2. Поперечні абератії 2-го степеневого порядку .....	84
5.3. Поперечні абератії 3-го степеневого порядку .....	90
<b>6. Відтворення абератійних характеристик зору людини за результатами аберометрії та апроксимації функцій хвильової абератії оптичної системи ока.</b>	
6.1. Відтворення карти абератійної складової рефракції оптичної системи ока за результатами аберометрії ока.....	98
6.2. Визначення аметропії за результатами аберометрії ока.....	98
6.3. Визначення астигматизму за результатами аберометрії ока...	103
6.3.1. Астигматизм ока при наявності 1-го, 2-го та 3-го степеневих порядків цієї абератії.....	109
6.3.2. Сферастигматизм оптичної системи ока.....	114
6.3.3. Астигматизм ока при наявності сферастигматизму і астигматизму першого та інших степеневих порядків...	118
6.4. Визначення СКВ хвильової абератії ока.....	121
<b>7. Відтворення характеристики якості зображення на сітковій глибині фокусної області за результатами аберометрії ока.</b>	
7.1. Визначення МІФ оптичної системи ока за допомогою радіусів „інерції”, що стосуються других гаусових моментів функції розсіювання точки.....	124
7.2. Визначення просторової роздільної здатності оптичної системи ока через радіуси „інерції” других гаусових моментів від функції розсіювання точки.....	140
7.3. Гострота зору і просторова роздільність здатності оптичної системи ока.....	151
7.4. Зв’язок між просторовою роздільною здатністю і глибиною фокусної області ОС ока.....	152
<b>8. Апаратні засоби вимірювання абератій оптичної системи ока.</b>	
8.1. Історичний нарис розвитку аберометрії ока...	159
8.2. Про розвиток сучасної офтальмологічної аберометричної апаратури.....	160
8.2.1. Метод аберометрії ока з використанням датчика	169

хвильового фронту Гартмана-Шека.....	170
8.2.2. Аберометрія ока методом реїтресинга.....	179
8.2.3. Аберометрія ока методом Чернінга.....	185
8.2.4. Аберометрія ока методом автоматичної скіаскопії.....	187
8.2.5. Аберометрія ока з використанням методу адаптивної компенсації хвильової абератії.....	190
8.2.6. Аберометрія ока на основі використання ефекту Таньбота.....	193
8.2.7. Аберометрія ока методом Фуко.....	195
8.3. Моделі сучасних аберометрів.....	199
<b>9. Методи та засоби контролю точності вимірювання хвильової абератії ока.</b>	
9.1. Дослідження точності вимірювань хвильової абератії ока сучасними аберометрами.....	206
9.2. Обґрунтування вимог до фізичної абератійної моделі оптичної системи ока.....	207
9.3. Моделі ока.....	225
9.3.1. Моделі схематичного ока.....	251
9.3.2. Фізичні моделі оптичної системи для попереднього настроювання офтальмологічних пристрій.....	250
9.3.3. Моделі ока для калібрування офтальмологічних аберометрів.....	259
9.3.4. Аналіз абератійних моделей оптичної системи ока.....	263
9.3.5. Двоізкова модель абератійної оптичної системи ока для тестування аберометрів.....	268
9.3.6. Хвильова абератія хвильової моделі ока.....	271
<b>Перелік посилань.....</b>	281

## ВСТУП

Нормальне функціонування зорового апарату є важливим фактором і показником стану здоров'я людини. Буль-які навіть невеликі патологічні зміни у функціонуванні зорового апарату знижують працевлаштність людини і утворюють фізичний та психологічний дискомфорт.

Найбільш поширеного виду зорового апарату є зменшення гостроти зору, яке частіше за все виникає або у молодому віці через виникнення короткозорості, або у зрілому віці через дальнозорість та втрату акомодаційної здатності. Має місце вікова зміна форми передньої поверхні роговки через її «обвісання» або появу на роговій локальних опуклостей – кератоконусів, що призводять до появи астигматизму, коми та інших різновидів спотворення зображень на сітківці. Всі ці види відносяться до типу абераційних.

З давніх часів людство створювало та вдосконалювало методи і технічні засоби коригування абераційних виду зору. Так з'явилися моноклі, окуляри, контактні та інтраокулярні лінзи із сферичними та асферичними поверхнями і дифракційними гратками на цих поверхнях. В останні два десятиліття, завдяки створенню ексимерних лазерів, потужних комп'ютерів та накопиченому досвіду механічної кератотомії, у світі поширилися лазерні хірургічні методи і технології коригування абераційних виду. Це надало потужний поштовх до розвитку сучасної аброметричної апаратури, за допомогою якої стало можливим аналізувати спектр абераційних виду, оцінювати величини абераційних мод, здійснювати доопераційний та післяопераційний контроль абераційного стану очичної системи ока, ефективно коригувати абераційні види і, в кінцевому результаті, істотно поліпшувати втрачену гостроту зору людини.

Поява в офтальмологічних клініках та кабінетах сучасної аброметричної апаратури, залучення у зв'язку з підм в офтальмологічну науку термінів, теорії та математичного апарату, яким раніше лікар-офтальмолог у повсякденній практиці не користувався, істотне збільшення інформації, присвяченії кінічним аброметричним дослідженням, привело до нагальної потреби мати посібник, в якому б точно і доступно для медичних працівників викладалися методи та складні питання, що стосуються математичного та апаратного забезпечення офтальмологічної аброметрії. У вітчизняній літературі, наскільки відомо авторам, таких праць поки що не має. Стимулом до

написання цієї монографії було не тільки прагнення ліквідувати цю прогалину, але й бажання викласти результати особистих досліджень і технічних розробок у галузі сучасної аброметрії та рефрактометрії ока, спрямувавши їх спеціалістам, які професійно займаються створенням новітньої офтальмологічної апаратури.

Значною мірою у монографії використані матеріали докторської дисертації професора Чижка І.Г., а також матеріали особистих дисертаційних досліджень його аспірантів – Афончиної Н.Б., та Шипи Г.О. Використані також результати аналітичного огляду великої кількості наукових праць, опублікованих у провідних періодичних закордонних виданнях та у патентній літературі. Ще однією задачею монографії було концентрування у одній книзі чисельних, розлорощених по багатьох виданих матеріалів, присвячених розробці сучасних офтальмологічних аброметрів, для ознайомлення з цим матеріалом наукових та інженерно-технічних працівників і студентів медичних і технічних вузів України.

Автори сподіваються, що викладений в цій монографії інноваційний матеріал запікветь працівників вітчизняних компаній та підприємств, що розробляють та виробляють медичну офтальмологічну апаратуру, а також він буде сприятим більш глибокому ознайомленню медичних працівників України з сучасними методами вимірювання та вимірювання параметрів абераційних виду ока.

118 Галецкий С.О., Беляков А.И., Черезова Т.Ю., Кудряшов А.В. Создание модели человеческого глаза методами адаптивной оптики. // Оптический журнал, 2006. – Том 73. – № 7. – Июль. – С.79 – 82.

119 Шиша Т.О., Чиж І.Г. Моделювання аберасій оптичної системи ока Ч. 1. Огляд і порівняльний аналіз фізичних аберасійних моделей ока. // Наукові вісті. 2009. – №5. – С. 104 – 111.

120 Україна, Патент № 27813 від 12.11.07 на корисну модель /Абератор

оптичної системи ока для тестування офтальмологічних аберометрів / МКБ А61В 3/00. / Чиж І.Г., Шиша Т.О.

121 Чиж І.Г., Афончина Н.Б., Шиша Т.О. Модель оптичної системи ока для тестування і сертифікації офтальмологічних аберометрів // Вісник національного технічного університету України «КПІ»/ Приладобудування – 2007. – № 27. – С. 150 – 157.

122 Шиша Т.О., Чиж І.Г. Моделювання аберасій оптичної системи ока. Ч.2 Технологічні похибки дволінзової аберасійної фізичної моделі ока// Наукові вісті НТУУ «КПІ», 2009. – №6. – С. 116 – 123.

123 Чиж І.Г. Визначення величини аметропії за допомогою функції хвильової аберасії оптичної системи ока // Наукові вісті НТУУ «КПІ». – 2002. – №2. – С. 100 – 106.

## Аберометрія оптичної системи ока людини

Монографія

Чиж Ігор Генріхович  
Тимчик Григорій Семенович  
Шиша Тетяна Олександровна  
Афончина Наталія Борисівна

Наукове видання

В листоруській редакції

Надруковано з оригінал-макета замовника

Темпплан 2013 р., поз. 3-1-004

Підп. до друку 22.01.2013. Формат 60×84<sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Папір офс. Гарнітура Times.  
Способ друку – ризографія. Ум. друк. арк. 16,97. Обл.-вид. арк. 28,22. Зам. № 13-10.  
Наклад 500 пр.

---

НТУУ «КПІ» ВПЛ ВПК «Політехніка»  
Свідоцтво ДК № 1665 від 28.01.2004 р.  
03056, Київ, вул. Політехнічна, 14, корп. 15  
тел. (044) 406-81-78