

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЧЕРКАСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Р. В. Трембовецька

ОПТИЧНІ ТА КВАНТОВІ МЕДИЧНІ ПРИЛАДИ

ПРАКТИКУМ

для студентів напряму підготовки
6.051003 «ПРИЛАДОБУДУВАННЯ»
спеціальності «МЕДИЧНІ ПРИЛАДИ ТА СИСТЕМИ»

Черкаси



2010

УДК 615.47 (07)
ББК 34.7
Т 66

*Рекомендовано до друку Вченою радою Черкаського
державного технологічного університету,
протокол № 3 від 23.11.2009 р.*

Автор-укладач **Трембовецька** Руслана Володимирівна, *к.т.н., доцент*

Рецензенти: **Задорожній** І.С., *д.т.н., професор*
Мусієнко М.П., *д.т.н., професор*

Трембовецька Р. В. Оптичні та квантові медичні прилади :
Т 66 практикум для студентів напряму підготовки 6.051003
«Приладобудування» спеціальності «Медичні прилади та системи»
[Електронний ресурс] / Авт.-укл. : Р. В. Трембовецька ; М-во освіти і
науки України, Черкас. держ. технол. ун-т. – Черкаси: ЧДТУ, 2010. –
212 с.
ISBN 978-966-402-094-4

У виданні подано теоретичні положення навчальної дисципліни «Оптичні та квантові медичні прилади». Практичні заняття спрямовані на напрацювання навичок розрахунку елементів оптичних систем. Лабораторний комплекс модулів «Геометрична оптика» і «Фізична оптика» спрямований на проведення натурних (імітаційних) дослідів і набуття студентами практичних навичок роботи з лабораторним устаткуванням, обчислювальною технікою, вимірювальною апаратурою, методикою експериментальних досліджень та обробки результатів.

Для студентів напряму підготовки 6.051003 «Приладобудування» спеціальності «Медичні прилади та системи» усіх форм навчання.

УДК 615.47 (07)
ББК 34.7

Навчальне видання

ОПТИЧНІ ТА КВАНТОВІ МЕДИЧНІ ПРИЛАДИ

ПРАКТИКУМ

для студентів напряму підготовки
6.051003 «ПРИЛАДОБУДУВАННЯ»
спеціальності «МЕДИЧНІ ПРИЛАДИ ТА СИСТЕМИ»

В авторській редакції

Комп'ютерне складання *Костенко Т.В., Салина Л.М.*
Дизайн обкладинки *Трохименко Н.К.*

Формат 60x84 1/8. Папір офс. Гарн. Times New Roman. Друк оперативн.
Ум. друк. арк. 24,64. Обл.-вид. арк. 13,74. Зам. № 10-е209.

Черкаський державний технологічний університет
Свідоцтво про державну реєстрацію ДК № 896 від 16.04.2002 р.
Надруковано в редакційно-видавничому центрі ЧДТУ
бульвар Шевченка, 460, м. Черкаси, 18006.

ЗМІСТ

СПИСОК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ	5
ВСТУП	9

Частина I. ПРАКТИЧНІ ЗАНЯТТЯ

МОДУЛЬ 1 «ГЕОМЕТРИЧНА ОПТИКА»

ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ №1.1	
Визначення кардинальних точок оптичної системи	12
ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ №1.2	
Заломлення та відбиття променів оптичною системою	33
ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ №1.3	
Волоконна оптика	42
ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ №1.4	
Оптичні деталі приладів	53

Частина II. ЛАБОРАТОРНІ РОБОТИ

ЗАГАЛЬНИЙ ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ ЛАБОРАТОРНИХ РОБІТ	67
ВИМОГИ ТЕХНІКИ БЕЗПЕКИ	67
ПРАВИЛА ТЕХНІКИ БЕЗПЕКИ ПРИ РОБОТІ З ЛАБОРАТОРНИМ ОБЛАДНАННЯМ	68
МОДУЛЬ 1 «ГЕОМЕТРИЧНА ОПТИКА»	
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №1.1	
Фізичні основи ендоскопії	69
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 1.2	
Вимірювання радіусів кривизни поверхонь оптичних деталей	86
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №1.3	
Вимірювання кутів і пірамідальності призм	102

МОДУЛЬ 2 «ФІЗИЧНА ОПТИКА»

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №2.1 Вимірювання показників заломлення оптичного скла	119
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №2.2 Спектрофотометр і його використання в медико-біологічних дослідженнях	134
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №2.3 Використання поляриметриї для визначення концентрації оптично активних речовин	150
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №2.4 Дослідження характеристик приймачів оптичного випромінювання	165
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №2.5 Дослідження характеристик світловипромінюючих діодів	179
ДОДАТКИ	
Додаток А Зразок оформлення титульної сторінки	195
Додаток Б Технічні характеристики деяких типів ендоскопів	196
Додаток В Конструкції деяких типів світлодіодів та інфрачервоних світловипромінюючих діодів	202
Додаток Г Основні технічні характеристики світловипромінюючих діодів	203
Додаток Д Оптичні постійні	207
ТЕРМІНИ ТА ВИЗНАЧЕННЯ	208

СПИСОК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

А

AB – розмір предмету
 A і A' - спряжені точки
 $AA\zeta$ - оптична вісь деякої центрованої системи
 a_1, a_2 - відліки по лімбу гоніометра

В

$B_{\text{поверхні}}$ - яскравість відбитого променя

С

C – концентрація оптично активної речовини
 c - ціна поділки шкали

Д

D, D' - діаметри вхідного і вихідного зрачків системи відповідно
 d - товщина лінзи по оптичній осі

Е

E_e - енергетична освітленість об'єкту вимірювання
 E – модуль пружності матеріалу мембрани
 E - внутрішнє електричне поле напівпровідника

Ф

F - передній головний фокус
 F – потужність світлового потоку
 $F_{\text{нов. min}}$ - світловий потік відбитий від поверхні
 F' - задній фокус системи
 f' - задня фокусна відстань
 f - передня фокусна відстань
 $f'_{\text{об}}$ - фокусна відстань об'єктива телескопічної системи

Н

H - передня головна площина
 H' - задня головна площина
 h – товщина діафрагми
 h - стрілка прогину
 h_1, h_2 - стрілка прогину випуклої та ввігнутої поверхні

I

I_e – енергетична сила світла

I_v - сила світла

$I_{пов}$ - сила світла поверхні

I_F - фотострум

I_S - темновий струм фотодіода

$I_{пр.мах}$ - максимально допустимий постійний прямий струм

$I_{с.д.}$ - струм, що протікає через світловипромінюючий діод

$I_{б.гр.}$ - граничне значення струму бази.

I_{nn}, I_{pp} - струм основних носіїв заряду відповідно в n і p – області

I_{np}, I_{pn} - струми, що утворенні неосновним носіями відповідно в p і n – області (дрейфовий струм)

K

K – коефіцієнт підсилення підсилювача

$K(P_{дов}, k_{эф})$ – квантиль розподілу при довірчій ймовірності $P_{дов}$ з ефективним числом степенів свободи $k_{эф}$

k – коефіцієнт систематичної складової похибки

L

L – довжина шляху хвилі в оптично активній речовині (довжина кювети)

L - яскравість

l, l_0 - ширина $p - n$ – переходу

N

NA - числова апертура оптичного волокна

NN' - головна оптична вісь

n, n_c - показник заломлення

n - кількість поділок шкали

P

P_o - потужність випромінювання світло випромінюючого діоду

R

R – радіус діафрагми

R – коефіцієнт відбиття світла від поверхні напівпровідника

R_{ex}, r_{ex} - вхідний опір каскаду і транзистора відповідно

R_T - темновий опір

R_0 - диференційний опір

r - радіус кривизни

r_k - радіус опорного кільця

r_o - динамічний опір СВД

S

S – площа випромінюючої поверхні

S - коефіцієнт насичення

S_I - струмова чутливість

S_U - вольтова чутливість

S_I - спектральна чутливість

$S'_{F'}$, S_F - задній та передній фокальний відрізок

$S'_{H'}$, S_H - положення головних площин відносно вершин сферичних поверхонь

s - відстань від вершини поверхні

s' - відстань від заломлюючої поверхні до спряженої точки A'

T

T – температура тіла випромінення

T – тривалість паузи

U

U_{np} - постійна пряма напруга

$U_{зв.мах}$ - максимально допустима зворотна постійна напруга

$U_{мах}$ - максимально допустима напруга

U_p - робоча напруга

$U_{ж}$ - напруга джерела живлення

$U_{с.д.}$ - падіння напруги на світло випромінюючому діоді

$U_{КЭв\text{і}д\text{к}лр.}$ - залишкова напруга на транзисторі в відкритому стані.

$U_{зм}$ - пряме падіння напруги на світло випромінюючому діоді

Q

Q - скважність

Φ - оптична сила системи

a - повздожнє збільшення оптичної системи

a - постійна часу експоненційного струму

α - коефіцієнт оптичного поглинання

$a_{кр}$ - критичний кут

b - лінійне збільшення оптичної системи

b - коефіцієнт посилення струму

g - кутове збільшення оптичної системи

g - кут відхилення променів внаслідок пірамідальності

σ - кут до оптичної осі

θ - кут заломлення призми; кут, що входить в волокно

ω - кут відхилення

$2w$ - кутове поле в просторі предметів об'єктива

$2w'$ - кутове поле в просторі зображення окуляра

e - кут падіння

e' - кут відбиття або заломлення

ϵ - випромінююча здатність тіла

Δ - відносна різниця коефіцієнтів заломлення

$\Delta_{HH'}$ - відстань між головними площинами (головними точками)

$\Delta z'$ - похибка відліку за шкалою переміщення окуляра

Δ_h - абсолютна похибка не виключеної систематичної похибки вимірювання прогину стрілки

Δ_{r_k} - абсолютна похибка не виключеної систематичної похибки вимірювання радіусу кільця

Δr - абсолютна похибка не ви

ключеної систематичної похибки вимірювання радіусу кульки

$\Delta_{\Sigma_{дов.}}$ - довірчий інтервал сумарної похибки

$\Delta E = h \cdot n$ - ширина забороненої зони напівпровідника

d - діоптрійне зміщення окуляра

d_A - максимальне переміщення мембрани в центрі

I_{max} - довжина хвилі; максимум спектрального розподілу

μ - коефіцієнт Пуассона

r - радіус сталюї кульки

$s = 5.67 \cdot 10^{-8} \frac{Wm}{m^2 \cdot K^4}$ – постійна Стефана – Больцмана

s_r - середньоквадратична похибка вимірювання радіусу кривизни поверхні

s_{r_k}, s_r - середньоквадратична похибка радіусу кільця та сталюї кульки

s_h - середньоквадратична похибка вимірювання стрілки прогину

s_i - СКВ або оцінка СКВ випадкової похибки результату вимірювання i -го аргументу

j - кут між гранями призми або клина

j_k - висота потенційного бар'єру

$[j_0]$ – питоме обертання

ψ - кут обертання площини поляризації оптично активною речовиною (в градусах чи радіанах);

t_i - тривалість імпульсу

n - частота випромінювання

ВСТУП

Сучасні оптичні прилади відіграють суттєву роль і слугують невід'ємною частиною науково-технічного прогресу. Оптичні і оптико-фізичні методи вимірювання і прилади використовуються в багатьох галузях – машинобудуванні та приладобудуванні для контролю точних деталей; в телебаченні та зв'язку; в сільському господарстві та харчовій промисловості; для наукових досліджень в галузі біології, екології, фізики та медицині. Прогрес медичної науки і техніки, клінічної медицини в значній мірі визначається досягненнями в області оптичної електроніки. Оптико-електронна медична апаратура на основі світло випромінюючих діодів та лазерів має надзвичайно широкі можливості при лікуванні хворих із різноманітними захворюваннями.

Спеціалісти, які здатні творчо забезпечити створення та удосконалення оптичних електронних приладів і систем, повинні мати основні уявлення та прикладні знання в дисципліні «Оптичні та квантові медичні прилади».

Посібник побудований відповідно до кредитно-модульної системи організації навчального процесу, а саме, матеріал згруповано у два змістові модуля «Геометрична оптика», «Фізична оптика».

Змістовий модуль «Геометрична оптика» містить 4 практичні заняття, які спрямовані на напрацювання практичних навичок розрахунку елементів оптичних систем.

На практичних заняттях детально розглядаються окремі теоретичні положення навчальної дисципліни «Оптичні та квантові медичні прилади» та формуються у студентів вміння та навички їх практичного застосування шляхом індивідуального виконання завдань. Практичне заняття включає:

- проведення попереднього контролю знань за питаннями, що наводяться до кожної роботи;
- розв'язування завдань з їх обговоренням та встановленням незрозумілих, складних моментів;
- розв'язування індивідуальних завдань, їх перевірку;
- оцінювання кінцевого рівня знань за питаннями, що пропонуються до кожної роботи.

Практичне заняття №1.1 знайомить студентів з кардинальними елементами оптичної системи; залежностями між положенням, розмірами предмету та зображення; кутовим, лінійним та повздовжнім збільшенням; властивостями фокальних площин.

Практичне заняття №1.2 розглядає теоретичні положення при заломленні променів сферичною поверхнею та призмою; при відбитті променів сферичною поверхнею.

Практичне заняття №1.3 знайомить з принципами розповсюдження світла в оптоволоконні; розглядає різні типи волоконно-оптичних датчиків які застосовуються в медицині; наводиться приклад розрахунку волоконно-оптичного датчика тиску із відбивною діафрагмою.

Практичне заняття 1.4 знайомить із основною класифікацією лінз та їх конструктивними параметрами. Наведені приклади розрахунку 10 основних лінз.

Змістовий модуль «Геометрична оптика» містить 3 лабораторні роботи, змістовий модуль «Фізична оптика» містить 5 робіт, які спрямовані на проведення натурних (імітаційних) дослідів з метою практичного підтвердження окремих теоретичних положень даної навчальної дисципліни. При цьому студент набуває практичних навичок роботи з лабораторним устаткуванням, обладнанням, обчислювальною технікою, вимірювальною апаратурою, методикою експериментальних досліджень та обробки результатів.

Лабораторна робота включає:

- проведення попереднього контролю знань за питаннями, що наводяться до кожної роботи;
- виконання теми заняття;
- оформлення індивідуального звіту з виконаної роботи;
- захист лабораторної роботи за питаннями, що пропонуються.

Лабораторна робота №1.1 знайомить з ендоскопічними методами дослідження внутрішніх органів людини, способами ендоскопії, класифікацією ендоскопів. Студенти вивчають конструкцію гнучкого ендоскопа, жорсткого цистоскопа їх оптичні схеми.

Лабораторна робота №1.2 присвячена вимірюванню радіусів кривизни поверхонь оптичних деталей. Створення оптичних приладів неможливо без вимірювання і контролю його параметрів. Якість зображення багато в чому залежить від того наскільки точно відповідають розрахунковим значенням радіуси кривизни сферичних поверхонь, що отримані при обробці. Тому вимірювання радіусів сферичних поверхонь є обов'язковою операцією як при виготовленні, так і при прийманні оптичних деталей.

Лабораторна робота №1.3 присвячена вимірюванню кутів і пірамідальності призм. В вимірювальних приладах широко застосовуються відбиваючі та заломлюючі призми, оптичні клинці та багатогранники. Всі ці деталі утворені плоскими заломлюючими та відбиваючими поверхнями, які розташовані під різними кутами одні до одної. Ребра між робочим гранями призм, що розвертаються у плоско паралельні пластинки, повинні бути паралельні між собою, їх непаралельність призводить до пірамідальності призми. При контролі призм та клинців вимірюють не тільки кути між їх гранями, але і кути відхилення променів, що пройшли крізь ці деталі.

Лабораторна робота №2.1 присвячена вимірюванню показників заломлення оптичного скла. Показник заломлення – важлива оптична характеристика прозорих середовищ. Найбільш розповсюдженими методами вимірювання показників заломлення і дисперсії оптичних матеріалів у видимій області спектру є гоніометричні, рефрактометричні та інтерференційні. Ці методи забезпечують необхідну у більшості випадків точність вимірювання і використовуються для вимірювання за допомогою серійних приладів.

На занятті студенти вивчають фізичні закони відбиття і заломлення світла на границі розділу двох середовищ. Набувають навичок роботи з рефрактометром. Досліджують залежність показника заломлення розчину від його концентрації.

Лабораторна робота № 2.2 знайомить із спектрофотометром та його використанням в медико-біологічних дослідженнях. Властивості атомів і молекул поглинати світло з характерною довжиною хвилі, характерною для даної речовини, широко використовуються в медицині і фармації для якісних досліджень. Вимірювання спектрів поглинання дозволяє судити про хімічний склад речовини і його стан в біологічних структурах. Для реєстрації спектрів поглинання використовуються прилади спектрофотометри.

На занятті студенти вивчають закони поглинання світла, як теоретичну основу спектрофотометрії; вивчають оптичні властивості дисперсійної спектральної призми

Лабораторна робота 2.3 знайомить із використанням поляриметриї для визначення концентрації оптично активних речовин. Поляриметрия широко застосовується в медицині, біофізиці і фармації для знаходження концентрації оптично активних речовин у розчині, для визначення чистоти ліків, для вивчення перетворень біополімерів.

На занятті студенти вивчають явище поляризації світла і оптичної активності. Вивчають будову поляриметра і навчаються користуватися ним. Набувають навичок в визначенні концентрації оптично активних речовин за допомогою поляриметра

Лабораторна робота № 2.4 присвячена дослідженню характеристики світло випромінюючих діодів. На занятті студенти вивчають принцип дії, параметри та характеристики світловипромінюючих діодів; режими живлення і схеми включення; методи компенсації часової і температурної нестабільності випромінювання світловипромінюючих діодів; знімають світлову характеристику $I_v = f(I_{np})$.

Лабораторна робота № 2.5 присвячена дослідженню характеристик приймачів оптичного випромінювання. На занятті студенти вивчають принцип дії вентильного елементу та фотодіода. Фотогальванічний і фотодіодний режими роботи. Спектральні характеристики фотодіода.

Досліджують вольт-амперну характеристику фотодіода в стаціонарних режимах. Досліджують перехідні характеристики при імпульсному освітленні фотодіода.

ЧАСТИНА І. ПРАКТИЧНІ ЗАНЯТТЯ

МОДУЛЬ 1 «ГЕОМЕТРИЧНА ОПТИКА»

ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ №1.1 ВИЗНАЧЕННЯ КАРДИНАЛЬНИХ ТОЧОК ОПТИЧНОЇ СИСТЕМИ

Мета роботи

1. Ознайомитися з основними положеннями геометричної оптики.
2. Визначити кардинальні точки оптичної системи.
3. Побудувати зображення предмету.

1. Підготовка до роботи

Вивчити за рекомендованою літературою наступні питання:

1. Закони геометричної оптики.
2. Коефіцієнт заломлення.

2. Теоретичні відомості

2.1 Кардинальні елементи [1-3, 6]

Будь-яку центровану систему, в тому числі і лінзу, можна задати так званими **кардинальними точками**:

- головним фокусами F, F' ;
- головними точками H, H' ;
- вузловими точками, які в найпростіших випадках співпадають з головними (рисунок 1.1).

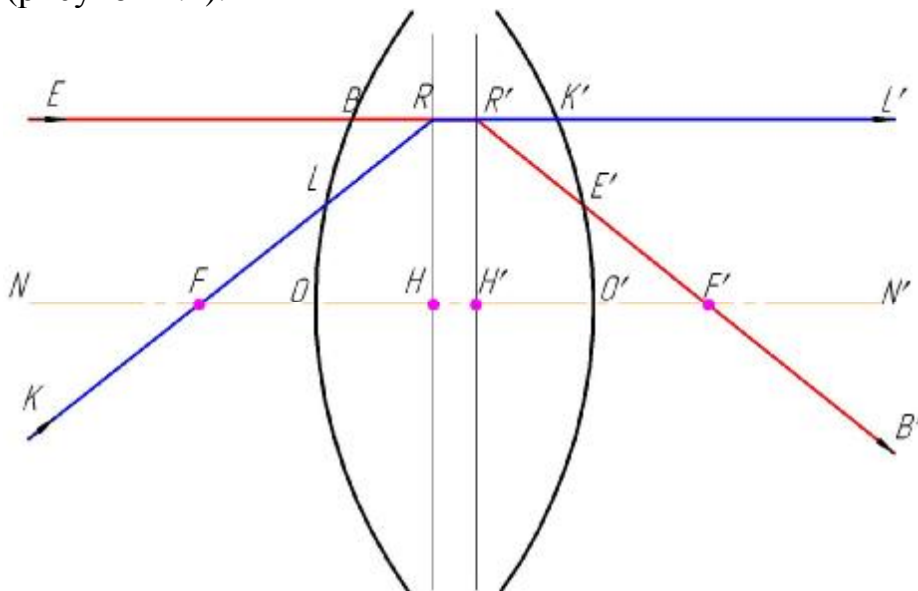


Рисунок 1.1 – Кардинальні точки оптичної системи

Таке уявлення є наближенням і можливо лише для ідеальної системи, тобто для системи в якій зберігається гомо центричність пучків променів і зображення геометрично побідне предмету. Теорія ідеальної оптичної системи була розроблена Е.Ф. Гаусом в 1841 р. За допомогою цієї теорії можна

повністю описати властивості оптичної системи, провести попередній розрахунок і отримати основні характеристики: збільшення, фокусні відстані, положення кардинальних точок, габарити та інше.

На рисунку 1.1 NN' - головна оптична вісь, відносно якої центрується системи. Якщо через систему пропустити пучок променів, паралельний до головної оптичної осі (промінь EB), то, відповідно до властивості ідеальної оптичної системи, після заломлення (промінь $E'B'$) вони пройдуть через головний фокус F' . Тому, промінь $E'B'$ буде спряженим, по відношенню до EB , що виходить із системи.

Передній головний фокус F характеризується тим, що пучок променів, який входить в систему через точку F , вийде із системи у вигляді пучка паралельного до оптичної осі. Тому, якщо промінь KL проходить через точку F , то спряжений до нього промінь $K'L'$ виходить із системи паралельно до головної оптичної осі рисунка 1.1.

Площини, проведені перпендикулярно головній оптичній осі через точки F та F' називаються **фокальними площинами системи**.

Дві спряжені площини, що розташовані перпендикулярно до оптичної осі, для яких лінійне збільшення ± 1 , називають **головними площинами**. Розрізняють передню і задню головні площини (рисунок 1.1).

Задня головна площина H' визначається перетином променів, що проходять паралельно осі в просторі предметів з їх продовженням після заломлення через систему.

Передня головна площина H визначається аналогічно як задня, якщо провести паралельно осі промінь в зворотному напрямку (зі сторони простору зображення).

Точки перетину головних площин з оптичною віссю є **головними точками системи**.

Заднім фокусом системи є точка F' . Точка F' на оптичній осі в просторі зображення, спряжена з нескінченно віддаленою точкою в просторі предметів, називається **заднім фокусом оптичної системи**.

Площина, яка проходить через задній фокус і перпендикулярна до оптичної осі, називається **задньою фокальною площиною** оптичної системи. Ця площина є зображенням нескінченно віддаленої площини.

Переднім фокусом системи є точка F . Точка F на оптичній осі в просторі предметів, спряжена з нескінченно віддаленою точкою в просторі зображення, називається **переднім фокусом оптичної системи**. Площину, перпендикулярну до оптичної осі, яка проходить через передній фокус, називають **передньою фокальною площиною**.

Задня фокусна відстань – відстань від задньої головної площини до заднього фокуса F' ($H'F' = f'$).

Передня фокусна відстань – відстань від передньої головної площини до переднього фокуса ($HF = -f$).

Фокуси, фокальні площини, головні площини, головні точки та фокусні відстані називають **кардинальними елементами оптичної системи**.

2.2 Залежності між положенням, розмірами предмету та зображення

Визначення кардинальних елементів дозволяє визначити положення та розмір зображення графічним методом. Для цього необхідно побудувати хід двох променів, що виходять із однієї позаосевої точки B предмету AB (рисунок 1.2).

Із побудови $H'M_1 = AB = y$, $HM_2 = A'B' = -y'$, і подібності трикутників ABF та FHM_2 визначаємо [1, 3, 6]:

$$\frac{-y'}{y} = \frac{-f}{-z} \Rightarrow \frac{y'}{y} = -\frac{f}{z} \quad (1.1)$$

Аналогічно для другої пари подібних трикутників $H'M_1F'$ і $F'A'B'$ маємо:

$$\frac{-y'}{y} = \frac{f'}{z'} \Rightarrow \frac{y'}{y} = -\frac{f'}{z'} \quad (1.2)$$

Прирівнюючи праві частини рівнянь (1.2) та (1.1) при $-f = f'$, отримаємо **формулу Ньютона** [1, 3, 6]:

$$\begin{aligned} z \cdot z' &= f \cdot f' \\ z \cdot z' &= f'^2 \end{aligned} \quad (1.3)$$

Із формули (1.1) (1.2) отримаємо формулу лінійного збільшення оптичної системи [1, 3, 6]:

$$b = \frac{y'}{y} = -\frac{f}{z} = -\frac{f'}{z'} \quad (1.4)$$

Положення спряжених точок A і A' можна також визначити відносно головних площин, тобто відрізками HA і $H'A'$. Початок цих відрізків лежить в точках H і H' . Використаємо позначення: $HA = -a$; $H'A' = a'$. Із рисунка 1.3 з урахуванням знаків визначаємо [1, 3, 6]:

$$\begin{aligned} z &= a - f; \\ z' &= a' - f' \end{aligned} \quad (1.5)$$

Підставивши значення (1.5) в формулу Ньютона, після спрощення отримаємо $f' \cdot a + f \cdot a' = a \cdot a'$. Розділивши обидві частини на aa' , отримаємо **формулу Гаусса, або формулу відрізків** [1, 3, 6]:

$$\frac{f'}{a'} + \frac{f}{a} = 1 \quad (1.6)$$

Якщо $-f = f'$, то формула (1.6) прийме вигляд [1, 3, 6]:

$$\frac{1}{a'} - \frac{1}{a} = \frac{1}{f'} \quad (1.7)$$

Лінійне збільшення системи можна виразити через відрізки a і a' . Із виразу (1.6) маємо:

$$\frac{a'}{a} = \frac{f' + z'}{f + z} \quad (1.8)$$

Підставляємо значення z' із формули (1.5) в вираз (1.8):

$$\frac{a'}{a} = \frac{f' \cdot z + f \cdot f'}{f \cdot (f + z)} = \frac{f'(z + f)}{z(z + f)} = \frac{f'}{z} \quad (1.9)$$

Із формули Ньютона як наслідок маємо:

$$\frac{a'}{a} = \frac{f'}{z} = \frac{z'}{f} \quad (1.10)$$

Співвідношення (1.10) дозволяє отримати вираз для лінійного збільшення через відрізки a і a' [1, 3, 6]:

$$b = -\frac{f}{f'} \cdot \frac{a'}{a} \quad (1.11)$$

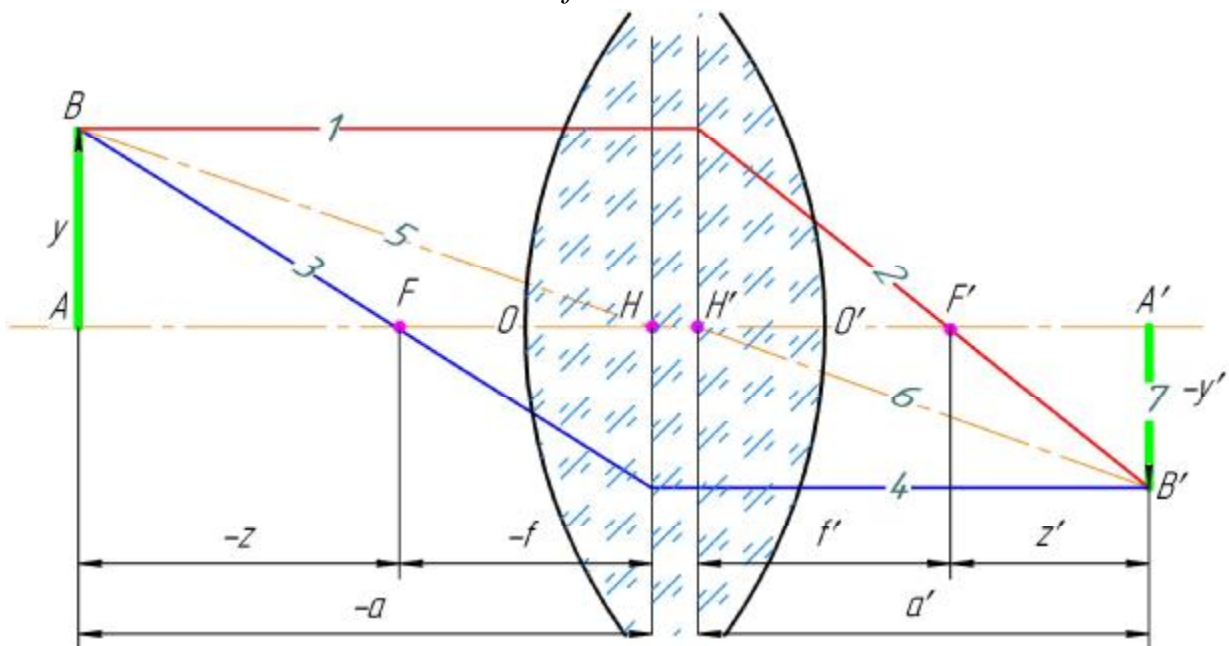


Рисунок 1.2 – Лінійне збільшення оптичної системи

Кутовим збільшенням оптичної системи називається відношення тангенсів кутів, утворених спряженими променями з оптичною віссю (рисунок 1.3) [1, 3, 6]:

$$g = \frac{\text{tg}(S')}{\text{tg}(S)} \quad (1.12)$$

Із рисунка 1.4 маємо:

$$\operatorname{tg}(S) = \frac{h}{a}; \operatorname{tg}(S') = \frac{h}{a'} \quad (1.13)$$

Підставляємо значення (1.13) в формулу (1.12), отримуємо: $g = \frac{a}{a'}$.

Приймаючи до уваги (1.12), знаходимо:

$$g = \frac{a}{a'} = \frac{z}{f'} = \frac{f}{z'} \quad (1.14)$$

Використовуючи співвідношення (1.14) і (1.11), отримуємо залежність між кутовим і лінійним збільшенням:

$$g = -\frac{f}{f'} \cdot \frac{1}{b} \quad \text{або} \quad g \cdot b = \frac{-f}{f'} \quad (1.15)$$

В окремому випадку, коли $-f = f'$, формула (1.15) має вигляд $g \cdot b = 1$. Формула (1.15) дозволяє визначити кутове збільшення в головних площинах.

Оскільки лінійне збільшення в головних площинах $b_H = +1$, то $g_H = -\frac{f}{f'}$, це означає, що промінь, який йде із точки B в точку H під кутом a_H , після заломлення повинен пройти через головну точку H' і вийти із системи під кутом a'_H , який не рівний куту a_H , оскільки $\operatorname{tg}(a'_H) = -\frac{f}{f'} \cdot \operatorname{tg}(a_H)$.

Тільки у випадку $-f = f'$, кути a'_H і a_H будуть рівні.

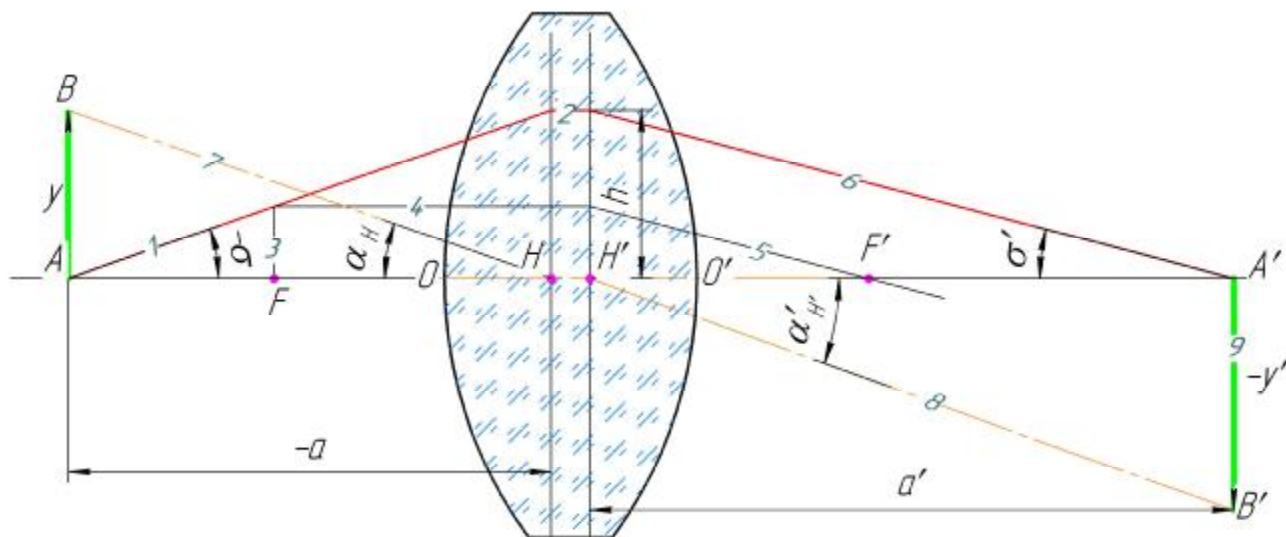


Рисунок 1.3 – Кутове збільшення оптичної системи

Повздовжнє збільшення оптичної системи це відношення відрізків $\Delta z'$ і Δz (рисунок 1.5) [1, 3, 6]:

$$a = \frac{\Delta z'}{\Delta z} \quad (1.16)$$

де $\Delta z = A_1 A_2 = z_2 - z_1$; $\Delta z' = A'_1 A'_2 = z'_2 - z'_1$.

Використовуючи формулу Ньютона, виражаємо відрізки z'_1 і z'_2 через відрізки z_1 і z_2 і фокусні відстані:

$$z'_1 = \frac{f \cdot f'}{z_1}; \quad z'_2 = \frac{f \cdot f'}{z_2} \quad (1.17)$$

Тоді

$$\Delta z' = z'_2 - z'_1 = f \cdot f' \cdot \left(\frac{1}{z_2} - \frac{1}{z_1} \right) = \frac{f \cdot f'}{z_2 \cdot z_1} \cdot (z_1 - z_2) \quad (1.18)$$

Підставляємо отриманий вираз в формулу (1.16), отримаємо:

$$a = \frac{\Delta z'}{\Delta z} = \frac{f \cdot f'}{z_2 \cdot z_1 \cdot (z_2 - z_1)} \cdot (z_1 - z_2) = -\frac{f \cdot f'}{z_2 \cdot z_1} \quad (1.19)$$

Помножимо чисельник і знаменник отриманого виразу на фокусну відстань, в результаті отримаємо:

$$a = -\frac{f \cdot f'}{z_2 \cdot z_1} \cdot \frac{f}{f} \quad (1.20)$$

Але відношення $\frac{f}{z_1}$ і $\frac{f}{z_2}$ представляють собою лінійне збільшення п площинах зображення обох пар спряжених площин, які проходять через спряжені точки і перпендикулярні до оптичної осі. Тоді

$$a = -\frac{f'}{f} \cdot b_1 \cdot b_2 \quad (1.21)$$

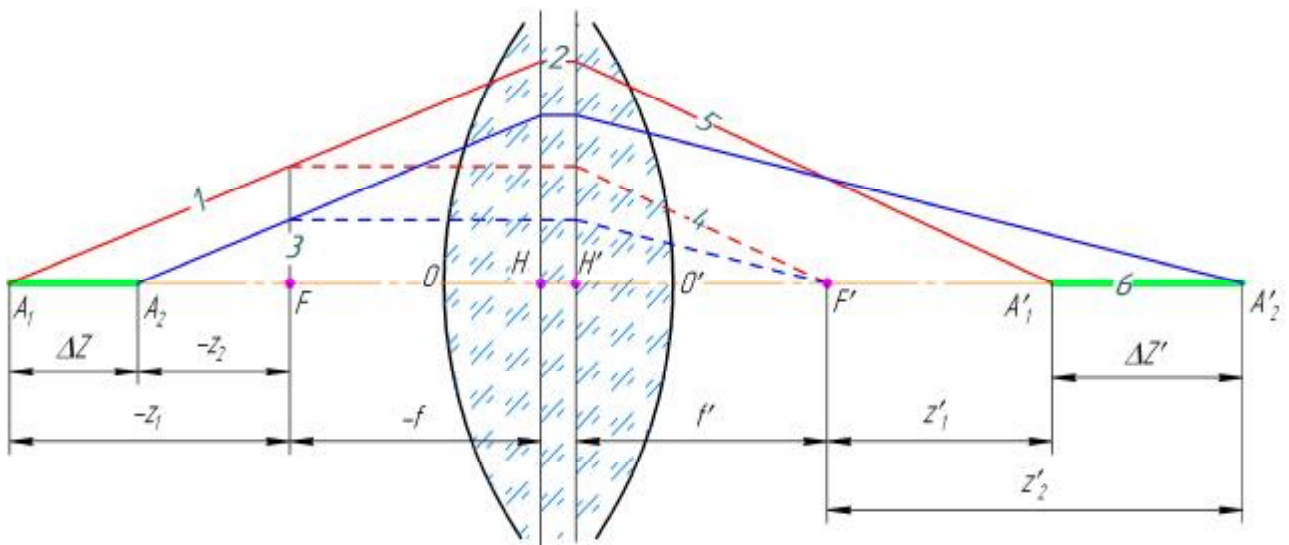


Рисунок 1.4 – Повздовжнє збільшення оптичної системи

Нехай точка A_2 наближається до точки A_1 , тобто $z_2 \rightarrow z_1$, тобто точка A'_2 буде наближатися до точки A'_1 і $z'_2 \rightarrow z'_1$. В цьому випадку збільшення b_2 буде прагнути до b_1 і в граничному випадку $b_2 = b_1$. Тоді формула (1.21) буде мати вигляд:

$$a = -\frac{f'}{f} \cdot b^2 \quad (1.23)$$

Якщо $-f = f'$, то $a = b^2$. Із формули (1.15) і (1.23) визначаємо [1, 3, 6]: :

$$a = \frac{b}{g} \quad (1.24)$$

Формула (1.24) зв'язує збільшення оптичної системи всіх трьох видів.

2.3 Побудова та розрахунок ходу променя крізь ідеальну оптичну систему

В практичній роботі при проектуванні оптичних приладів досить часто доводиться використовувати властивості кардинальних елементів та основні математичні співвідношення ідеальної оптичної системи. Чотири способи побудови ходу променя крізь позитивну на від'ємну оптичну систему показано на рисунку 1.5.

промінь 1	ННс	промінь 2
рисунок а		
промінь, що входить в оптичну систему паралельно до оптичної осі	Проходить до задньої головної площини паралельно до оптичної осі	виходить із оптичної системи через задній фокус F'
промінь, що входить в оптичну систему через головну точку H під деяким кутом a_H		виходить із оптичної системи із головної точки H' під кутом $a'_{H'} = a_H$
всі інші промені		паралельно до попередніх
пучок променів, що виходить із переднього фокусу F		виходить із оптичної системи пучком променів паралельних до оптичної осі
рисунок в		
промінь, що входить в оптичну систему і проходить через передній фокус F	Проходить до задньої головної площини паралельно до оптичної осі	виходить із оптичної системи паралельно до оптичної осі (точка перетину із задньою фокальною площиною B')
промінь, що входить в оптичну систему через головну точку H під деяким кутом a_H		виходить із оптичної системи із головної точки H' під кутом $a'_{H'} = a_H$ (точка перетину із задньою фокальною площиною B')
всі інші промені – паралельні до попередніх		збігаються до точки B'
пучок променів, що входить в оптичну систему паралельно до оптичної осі		виходить із оптичної системи через задній фокус F'

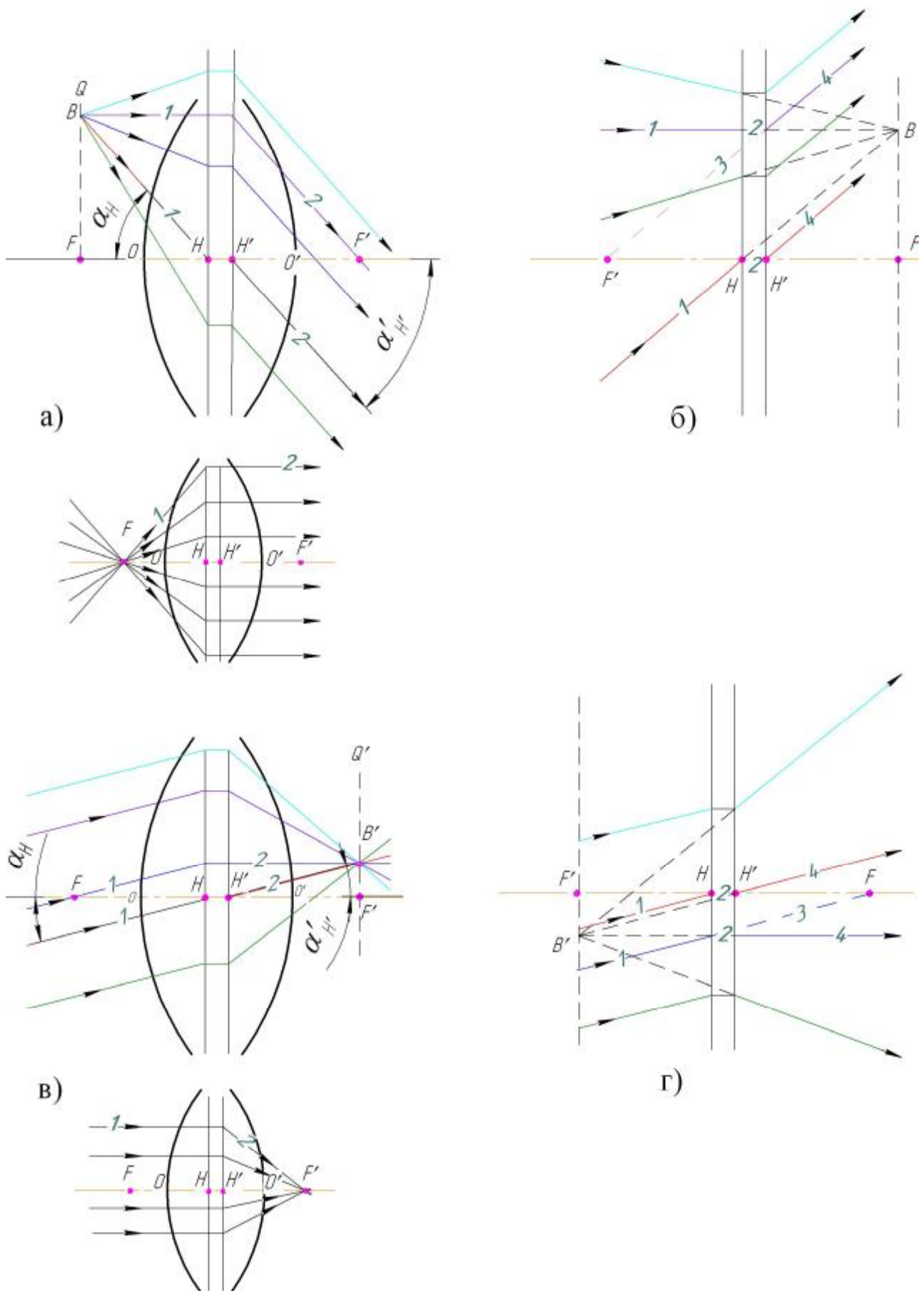


Рисунок 1.5 – Властивість фокальних площин:

а) позитивна оптична система: промені виходять із точки B фокальної площини або фокусу F ;

б) від'ємна оптична система: промені виходять із уявної точки B фокальної площини;

в) позитивна оптична система: промені падають паралельним пучком під деяким кутом до оптичної осі або паралельно до оптичної осі

г) від'ємна оптична система: промені падають паралельним пучком під деяким кутом до оптичної осі

промінь 1	2	промінь 3	промінь 4	промінь продовження
рисунок б		рисунок б		
промінь, що входить в оптичну систему паралельно до оптичної осі	Проходить до задньої головної площини паралельно до оптичної осі	від задньої площини H' проходить через задній фокус F'	виходить із оптичної системи від площини H' як продовження променя 3	продовження променів збираються в передній фокальній площині - точка B
промінь, що входить в оптичну систему через головну точку H під деяким кутом a_H		-	виходить із оптичної системи із головної точки H' під кутом $a'_{H'} = a_H$	
всі інші промені		-	паралельно до попередніх	
рисунок г			рисунок г	
промінь, що входить в оптичну систему і проходить через передній фокус F	Проходить до задньої головної площини паралельно до оптичної осі	від передньої площини H проходить через передній фокус F	виходить із оптичної системи паралельно до оптичної осі	продовження променів збираються в задній фокальній площині - точка B'
промінь, що входить в оптичну систему через головну точку H під деяким кутом a_H		-	виходить із оптичної системи із головної точки H' під кутом $a'_{H'} = a_H$	
всі інші промені - паралельні до попередніх		-	виходить із оптичної системи від площини H' як продовження свого променя	

3. Виконання роботи

Завдання 1. Властивість фокальних площин

Виконати моделювання оптичної системи зображеної на рисунку 1.5.

Результат моделювання представити у наступному вигляді.

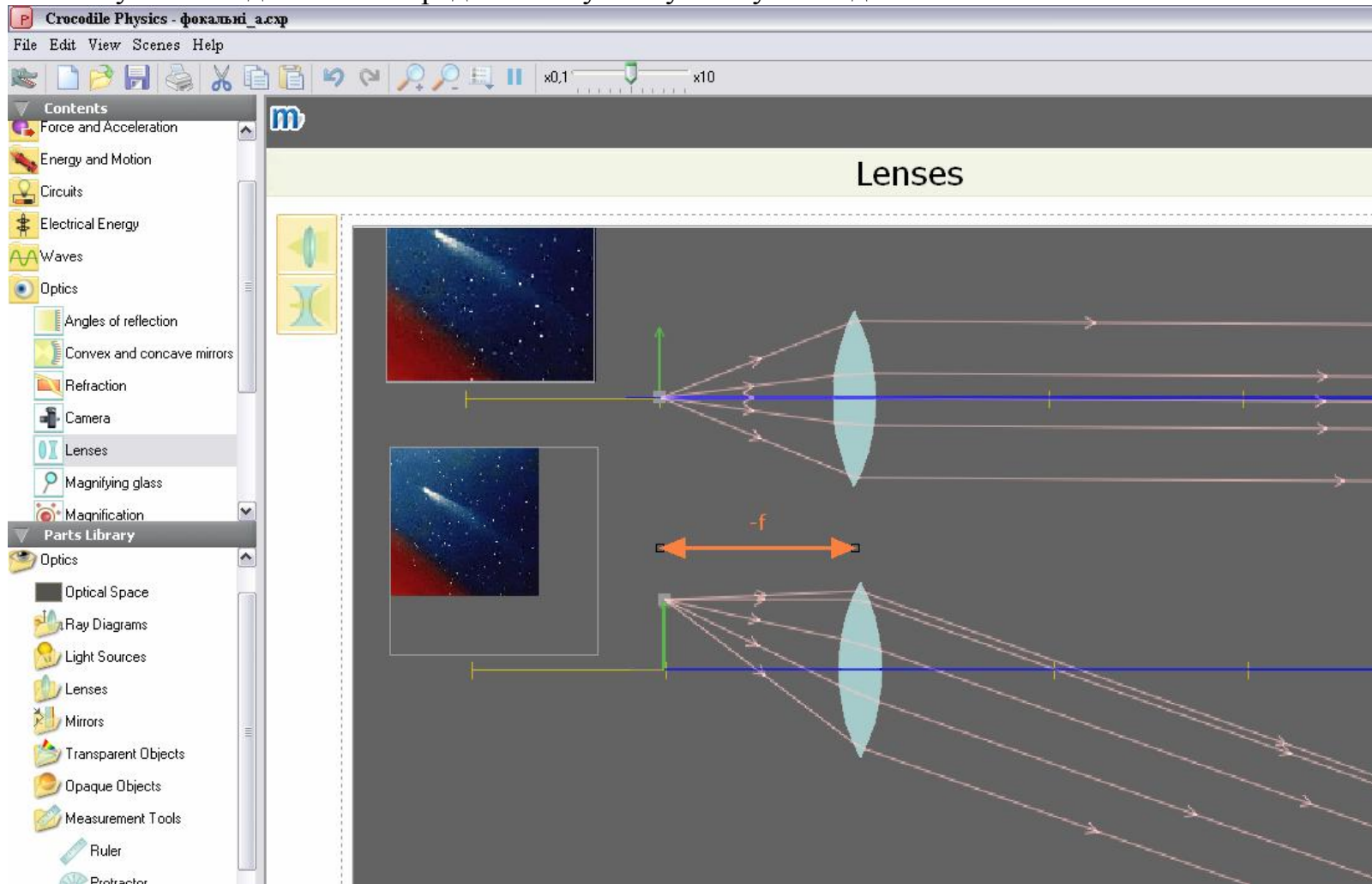


Рисунок 1.6 – Приклад виконання комп'ютерного моделювання оптичної системи рисунка 1.5 а

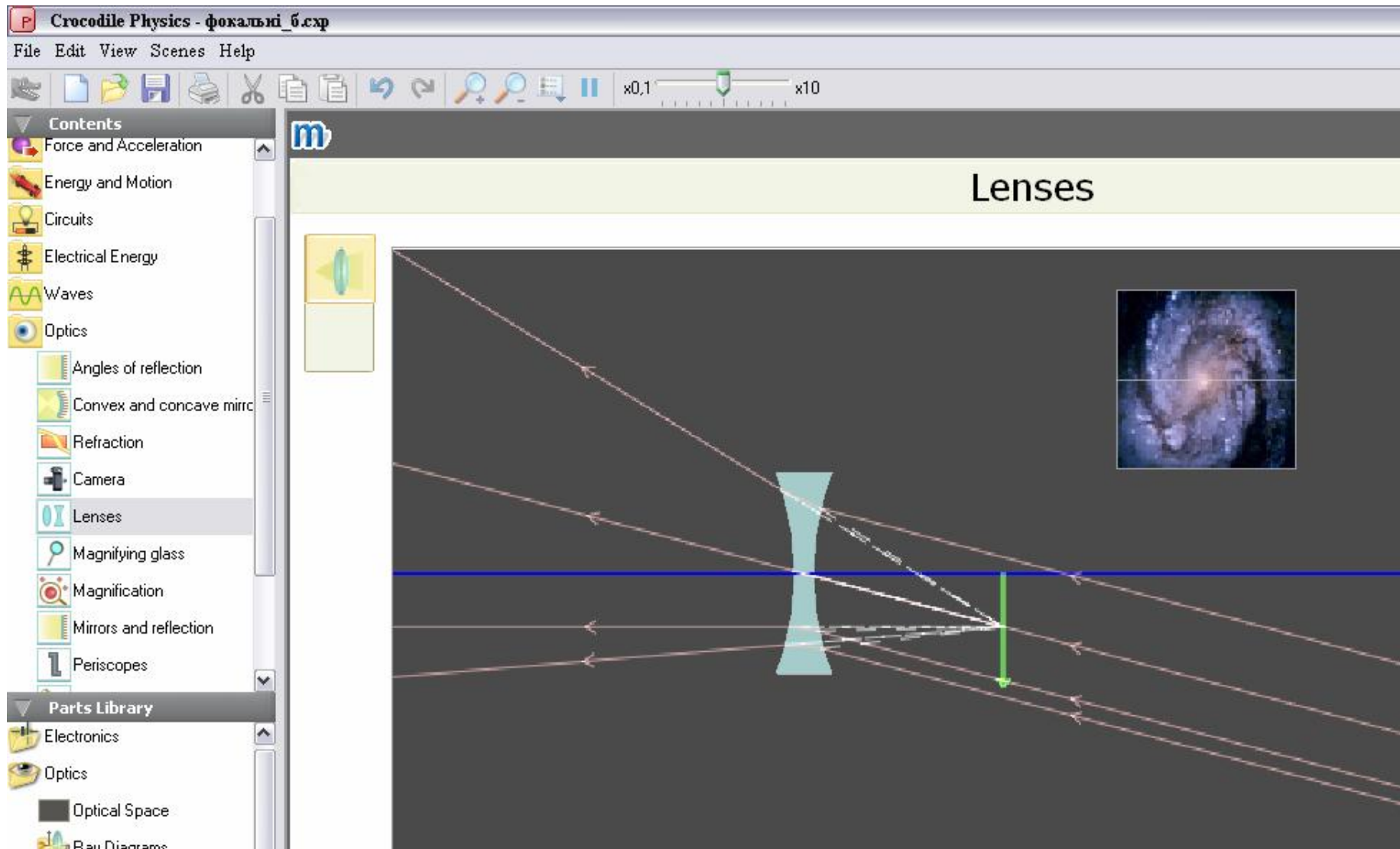


Рисунок 1.7 – Приклад виконання комп'ютерного моделювання оптичної системи рисунка 1.5 б

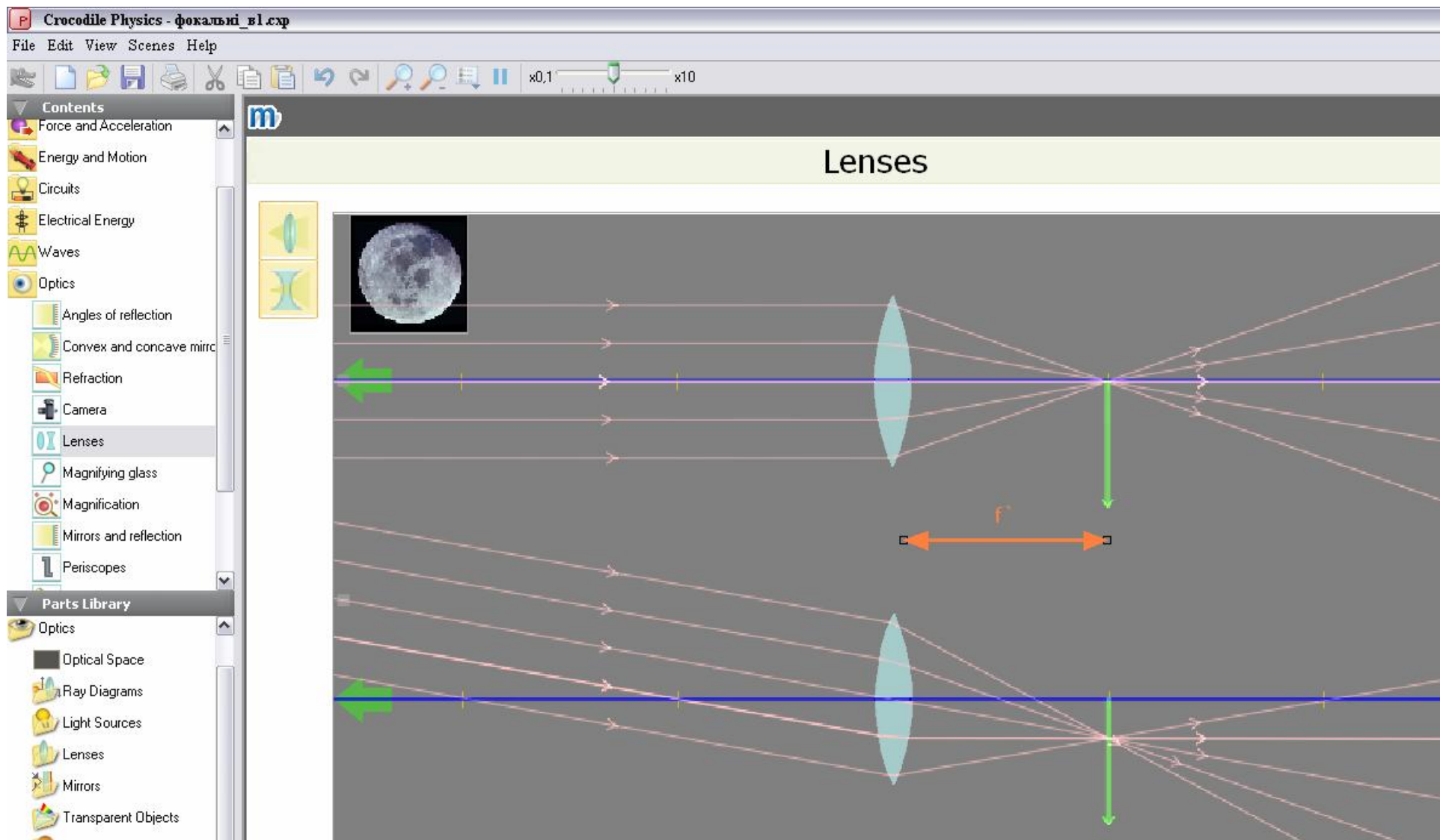


Рисунок 1.8 – Приклад виконання комп'ютерного моделювання оптичної системи рисунка 1.5 в

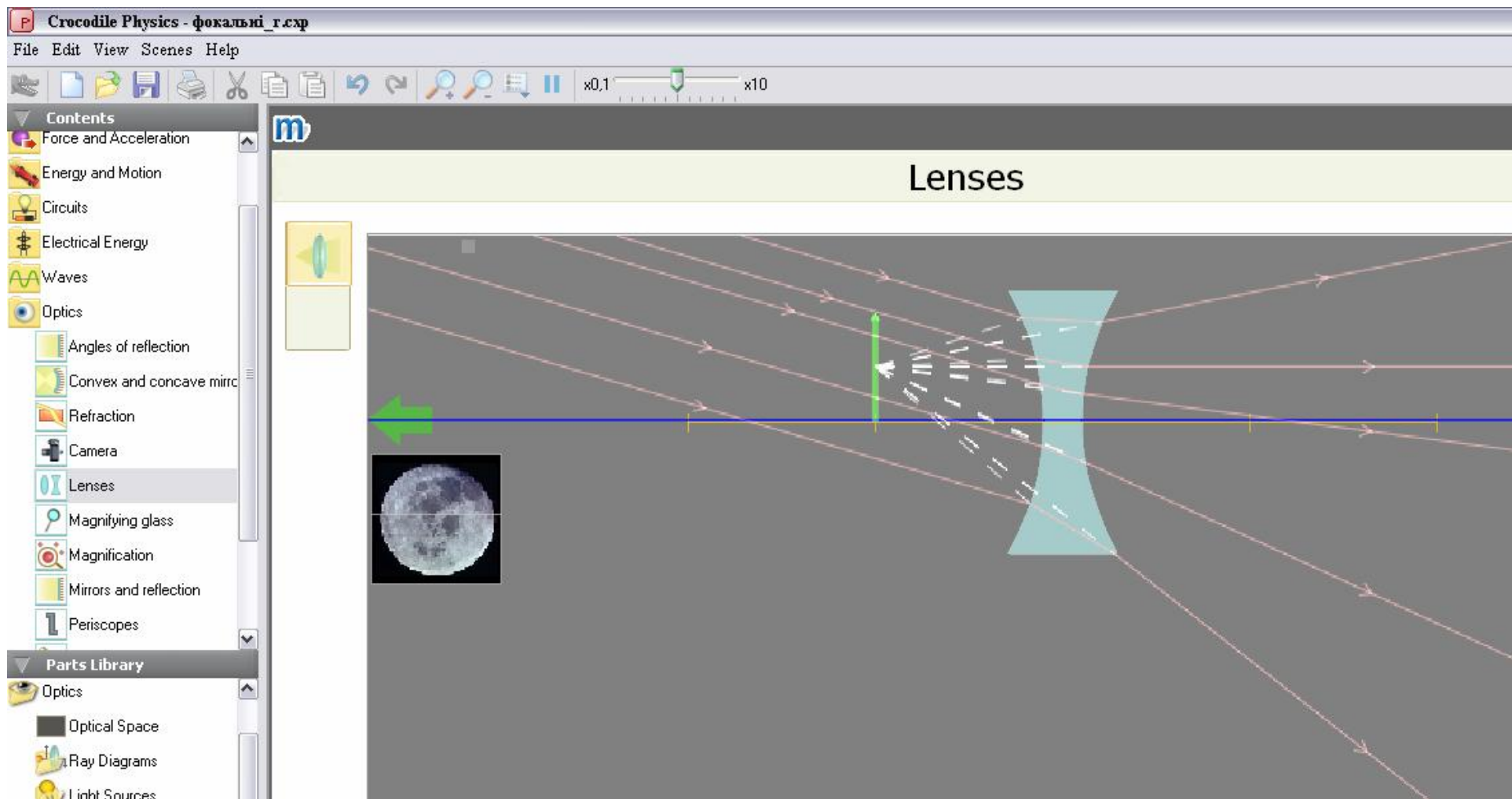


Рисунок 1.9 – Приклад виконання комп'ютерного моделювання оптичної системи рисунка 1.5 г

Завдання 2. Кутове та лінійне збільшення оптичної системи

Визначити кутове і лінійне збільшення оптичної системи.

варіант	Вихідні дані						Розрахункові результати									
	$-a$, мм	y , мм	$-f$, мм	$-z$, мм	$-s$, градус	a' , мм	$-a$, мм	$-f$, мм	$-z$, мм	a' , мм	g	b	s'	z' , мм	y' , мм	
1	30	10	25		20											
2	55	10	25		20											
3		20	10	20	20											
4		20	15	10	20											
5	30	20			20	55										
6	25	10			20	15										

Приклад 1.1

Дано $y = 26$ мм; $-f = f' = 43$ мм; $-a = 75$ мм; $-s = 20^\circ$.

Визначити кутове і лінійне збільшення оптичної системи.

Рішення

1. Визначаємо кутове збільшення оптичної системи за формулою:

$$g = \frac{z}{f'} = \frac{a-f}{f'} = \frac{-75 - (-43)}{43} = -0.744.$$

Із цієї ж формули:

$$g = \frac{a}{a'} \Rightarrow a' = \frac{a}{g} = \frac{-75}{-0.744} = 101 \text{ мм}.$$

2. Визначаємо лінійне збільшення оптичної системи:

$$b = -\frac{f}{f'} \cdot \frac{a'}{a} = -\frac{-43}{43} \cdot \frac{101}{-75} = -1.34.$$

У випадку коли фокусні відстані рівні: $g \cdot b = 1$;
 $-0.744 \cdot (-1.34) = 1$

3. Визначаємо кут s' із формули (1.12):

$$g = \frac{\text{tg}(s')}{\text{tg}(s)} \Rightarrow \text{tg}(s') = g \cdot \text{tg}(s)$$
$$s' = \text{arctg}(g \cdot \text{tg}(s)) = \text{arctg}(-0.744 \cdot \text{tg}(-20^\circ)) = 15^\circ 15'.$$

4. Визначаємо розмір зображення із формули (1.4):

$$b = \frac{y'}{y} \Rightarrow y' = b \cdot y = -1.34 \cdot 26 = -34.84 \text{ мм}.$$

Виконуємо побудову зображення I методом [1, 3, 6]:

1. Визначаємо зображення точки A .

- Проводимо передню і задню головну площини H і $H\zeta$. На відстані $-a = 75$ мм від передньої головної площини H проводимо відрізок $AB = y = 26$ мм, що відповідає розміру предмета; Відмічаємо фокусну відстань $-f = 43$ мм, це відрізок FH .

- Під кутом $-s = 20^\circ$ проводимо відрізок $AM1$ до перетину з передньою головною площиною. Проводимо відрізок $M1M1\zeta$ паралельно осі до перетину з задньою головною площиною;

- Із точки F проводимо перпендикуляр FM до перетину в променем $AM1$. З точки M проводимо промінь до перетину з площиною H і $H\zeta$ в точках $M2$ і $M2\zeta$. Із точки $M2\zeta$ проводимо промінь через задній фокус F' ;

- Із точки $M1\zeta$ проводимо промінь, що паралельний відрітку $M2\mathcal{F}\zeta$ до перетину з оптичною віссю. Точка перетину $A\zeta$ є зображенням точки A .

2. Визначаємо зображення точки B .

- Із точки B через передню головну площину H проводимо відрізок BH .

Цей відрізок утворює з оптичною віссю кут a_H . Визначаємо кут із трикутника BAH : $AB = AH \cdot \operatorname{tg}(a_H) \Rightarrow a_H = \operatorname{arctg}\left(\frac{y}{a}\right) = 19^\circ 12'$.

- Оскільки фокуси рівні $-f = f'$, то із точки $H\zeta$ під цим же кутом проводимо промінь $H\zeta$

Із точки $A\zeta$ проводимо перпендикуляр до перетину з променем проводимо перпендикуляр до перетину з променем $H\zeta$ Перетин визначає положення точки $B\zeta$ Відрізок $A'B' = 34,84$ мм є зображенням предмету.

Виконуємо побудову зображення II методом [1, 3, 6]:

1. Визначаємо зображення точки B .

- Із точки B проводимо промінь паралельно до оптичної осі до перетину з передньою та задньою головною площиною в точках $M2$ і $M2\zeta$ З точки $M2\zeta$ через задній фокус $F\zeta$ проводимо промінь.

- Із точки B через передню головну площину H проводимо відрізок BH .

Цей відрізок утворює з оптичною віссю кут a_H . Визначаємо кут із трикутника BAH : $AB = AH \cdot \operatorname{tg}(a_H) \Rightarrow a_H = \operatorname{arctg}\left(\frac{y}{a}\right) = 19^\circ 12'$.

- Оскільки фокуси рівні $-f = f'$, то із точки $H\zeta$ під цим же кутом проводимо промінь $H\zeta$

- Із точки B проводимо промінь через передній фокус F до перетину з передньою площиною H (точка $M3$). Із точки $M3$ проводимо промінь паралельно до оптичної осі.

- Всі три проведені промені перетинаються в одній точці B' , яка є зображенням точки B .

2. Із точки $B\zeta$ проводимо перпендикуляр до перетину з оптичною віссю. Точка перетину $A\zeta$ є зображенням точки A .

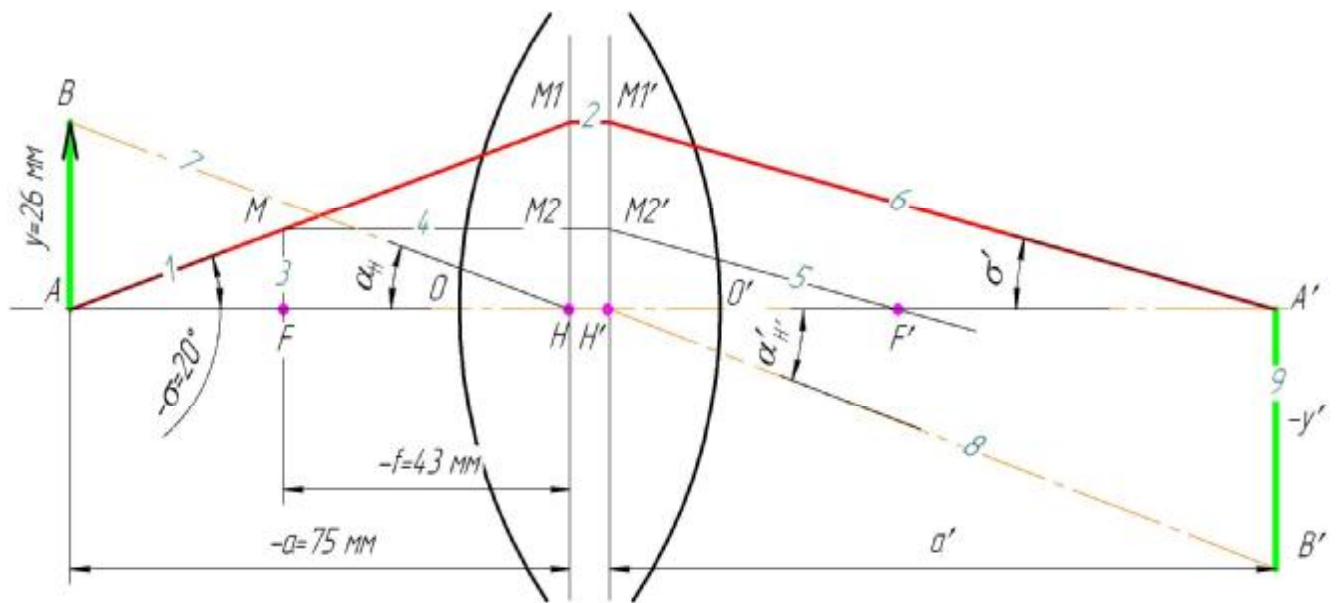


Рисунок 1.10 – Побудова зображення предмету I методом

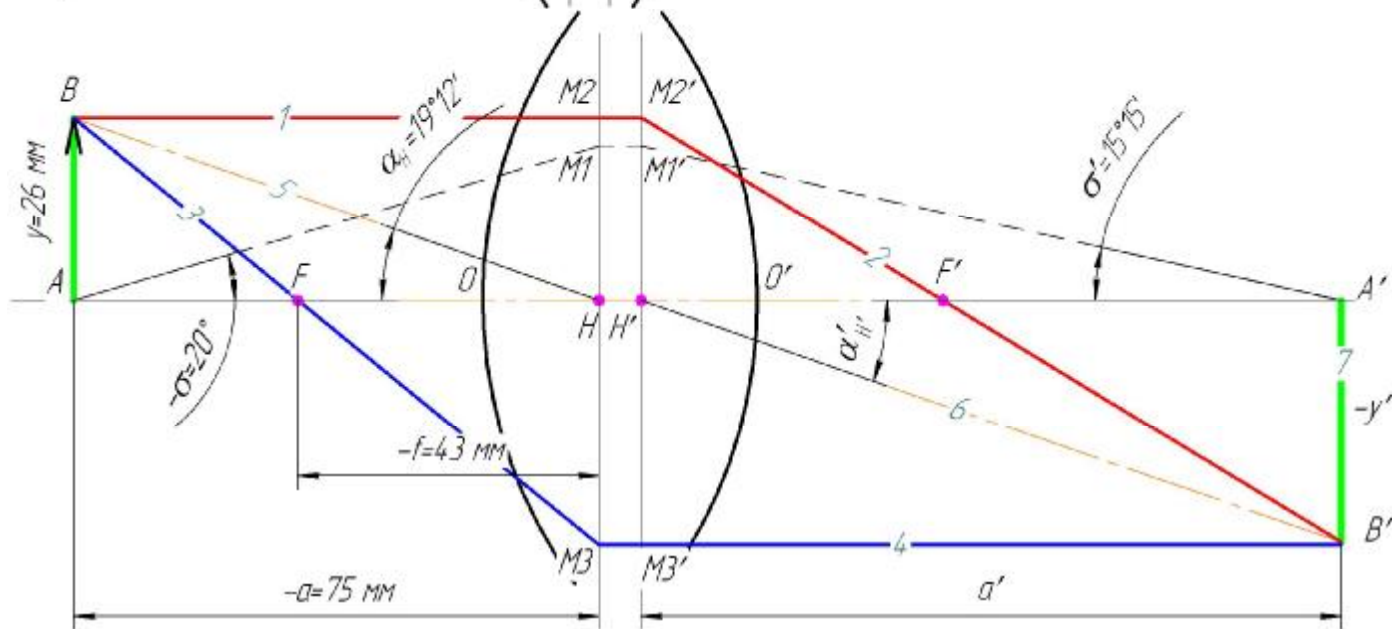


Рисунок 1.11 – Побудова зображення предмету II методом

Завдання 3. Повздовжнє збільшення оптичної системи

Дано відрізок ΔZ , фокусна відстань $-f$, відстань до предмету $-a$. Побудувати зображення повздовжнього предмету. Розрахувати основні параметри оптичної системи.

варіант	Вихідні дані			Розрахункові результати					
	$-a$, мм	$-\Delta Z$, мм	$-f$, мм	z_1 , мм	z_2 , мм	z'_1 , мм	z'_2 , мм	$\Delta z'$, мм	a
1	87	15	30						
2	75	15	35						
3	85	15	40						
4	77	17	30						
5	87	17	35						
6	95	17	45						

Приклад 1.2

Дано відрізок $A_1A_2 = -\Delta Z = 22$ мм, фокусна відстань $-f = 43$ мм, відстань до предмету $-a = 91$ мм. Побудувати зображення предмету.

Рішення

1. Із рисунка 1.4 визначаємо відстань $z_1 = a - f = -91 - (-43) = -48$ мм. Тоді відстань $z_2 = z_1 - \Delta Z = -48 - (-22) = -26$ мм.

2. Визначаємо відрізки:

$$z'_1 = \frac{f \cdot f'}{z_1} = \frac{-43 \cdot 43}{-48} = 38,52 \text{ мм}; \quad z'_2 = \frac{f \cdot f'}{z_2} = \frac{-43 \cdot 43}{-26} = 71,11 \text{ мм}.$$

3. Визначаємо розмір предмету:

$$\Delta z' = z'_2 - z'_1 = 71,11 - 38,52 = 32,59 \text{ мм}$$

$$\Delta z' = f \cdot f' \cdot \left(\frac{1}{z_2} - \frac{1}{z_1} \right) = -43 \cdot 43 \cdot \left(\frac{1}{-26} - \frac{1}{-48} \right) = 32,48 \text{ мм}$$

$$\Delta z' = \frac{f \cdot f'}{z_2 \cdot z_1} \cdot (z_1 - z_2) = \frac{-43 \cdot 43}{-26 \cdot (-48)} \cdot (-48 - (-26)) = 32,59 \text{ мм}$$

4. Повздовжнє збільшення оптичної системи:

$$a = \frac{\Delta z'}{\Delta z} = \frac{32,59}{22} = 1,48.$$

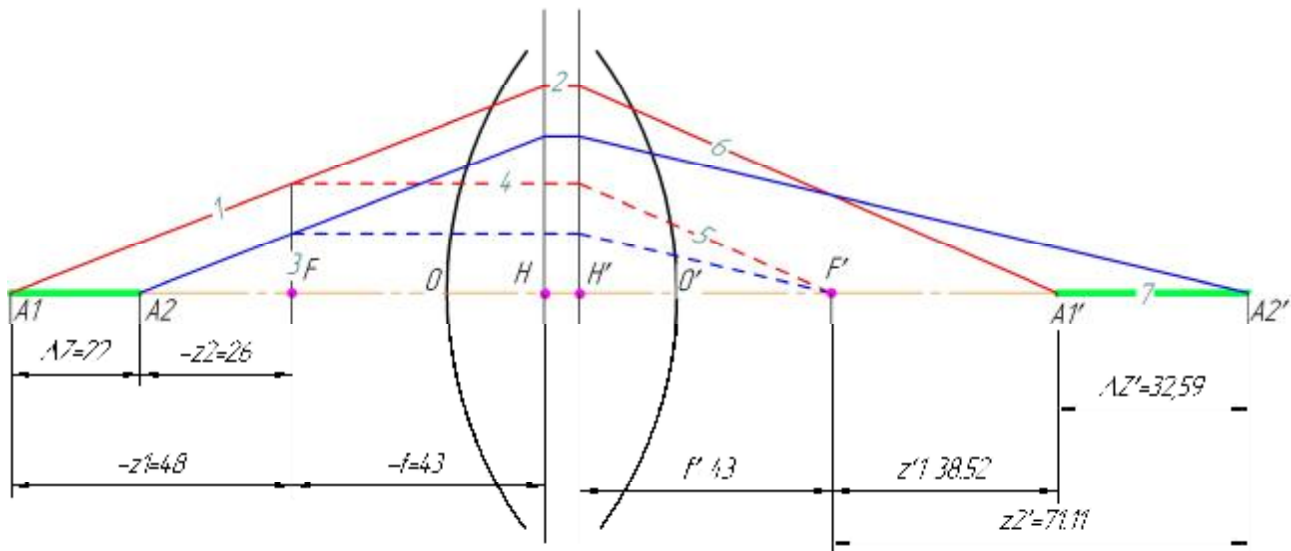


Рисунок 1.12 – Побудова зображення повздовжнього предмету

Завдання 4. Побудова зображення нахиленого предмету

Побудувати зображення в збираючій лінзі плоского предмету АВ, нахиленого до головної оптичної осі.

варіант	Вихідні дані				Розрахункові результати					
	$-a,$ мм	$-s,$ градус	$y,$ мм	$-f,$ мм	g	$a',$ мм	b	$s',$ градус	$z',$ мм	$y',$ мм
1	15	30	2	20						
2	10	30	2	20						
3	-10	30	2	20						
4	-25	30	2	20						
5	-45	30	5	20						
6	-35	30	5	20						

Приклад 1.3

Побудувати зображення в збираючій лінзі плоского предмету АВ, нахиленого до головної оптичної осі на кут $s = 110^\circ$

Рішення

1. Виконуємо подову зображення нахиленого предмету АВ.
2. Виконуємо побудову зображення точки В та С, використовуючи II метод побудови.
3. Виконуємо побудову зображення точки В та С, використовуючи I метод побудови.
 - Виконуємо побудову зображення точки А:
 - Продовжуємо площину предмету до перетину з передньою головною площиною (промінь 1);
 - Далі аналогічно (див. рисунок 1.13) (промені 2, 3, 4,5)
 - Виконуємо побудову зображення точки В (промені 6, 7);

- Виконуємо побудову зображення точки C (промені 8, 9)

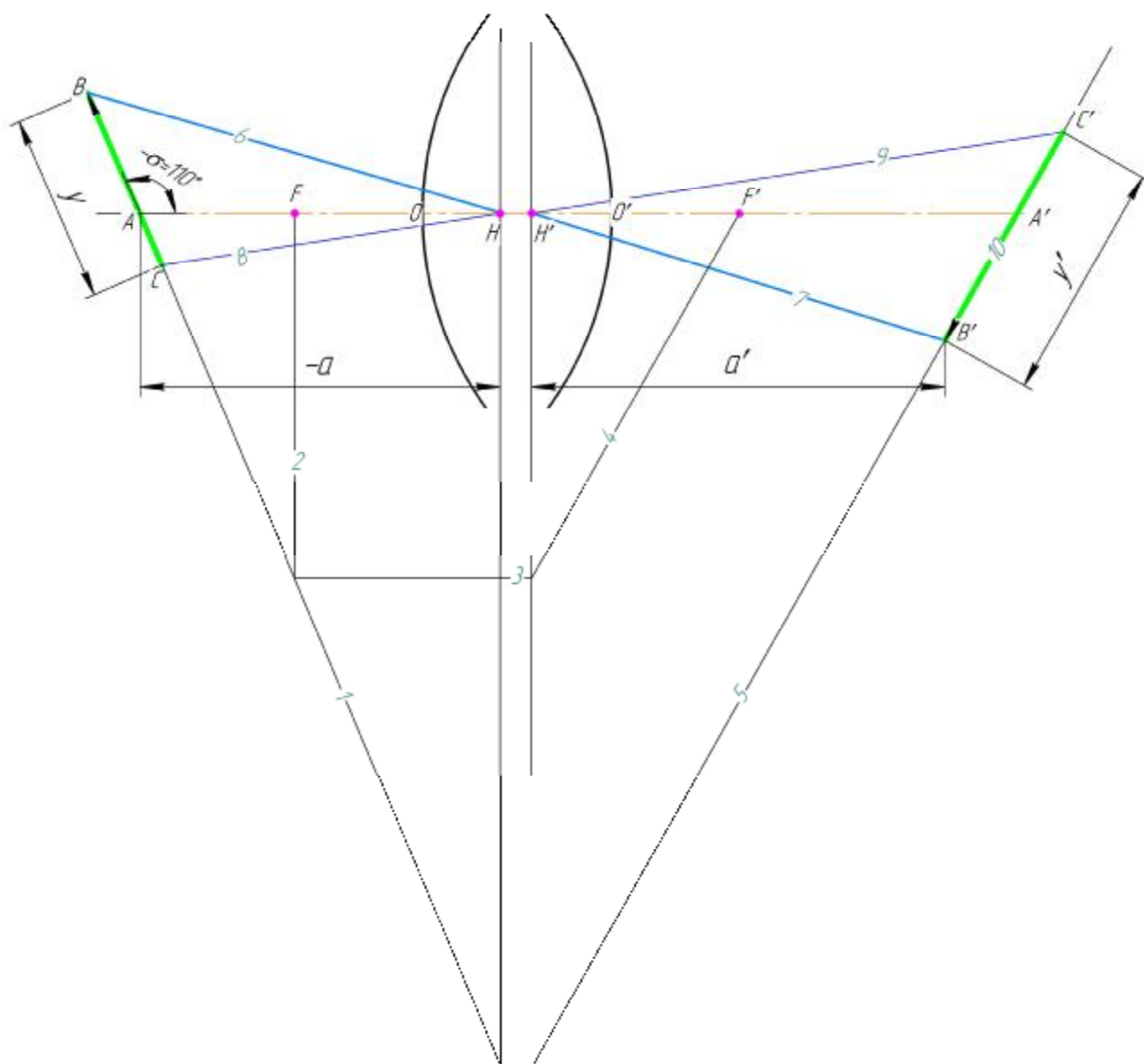
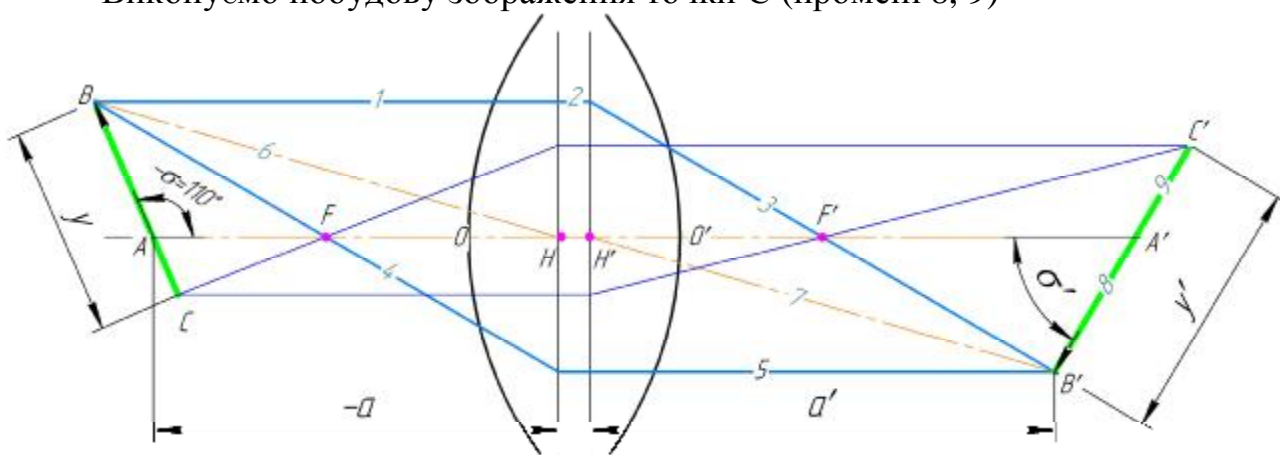


Рисунок 1.13 – Побудова зображення нахиленого предмету

Контрольні питання для перевірки кінцевого рівня знань

- 1 В якому граничному випадку хвильова оптика переходить в геометричну.
2. Які промені називають параксіальними?. Якими параметрами задають промінь на опорній площині?
3. Якими властивостями володіють фокальні точки оптичної системи? Що таке головні площини?
4. Як можна визначити перетворення променя параксіального променя в оптичній системі, якщо відомо положення її кардинальних точок?
5. Що таке спряжені площини? Як знайти в просторі зображення площину, спряжену з деякою площиною в просторі предметів?

Література

1. Гвоздева И.П., Коркина К.И. Прикладная оптика и оптические измерения –М.: Машиностроение, 1976.
2. Справочник конструктора оптико-механических приборов./ В.А. Панов, М.Я. Кругер, В.В. Кулагин и др.; Под общ. ред.. В.А.Панова. – Л.: Машиностроение, Ленингр. отд., 1980. – 742 с, ил.
3. Прикладная оптика: Учебное пособие для приборостроительных специальностей вузов / Л.Г. Бебчук, Ю.В. Богачев, Н.П. Заказнов и др.; Под общ.ред. Н.П. Заказнова. – М.: Машиностроение, 1988. - -312 с.
4. Ландсберг Г.С. Оптика. Учебн. пособие: для вузов – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. – 848 с.
5. Стафеев С.К., Боярский К.К., Башина Г.А. Основы оптики: Учебное пособие. – СПб.: Питер, 2006. – 336 с.
6. Заказнов Н.П. Теория оптических систем: Учебник для студентов приборостроительных специальностей вузов / Н.П. Заказнов, С.И. Кирюшин, В.Н. Кузичев. – М.: Машиностроение, 1992. – 448 с.

ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ №1.2

ЗАЛОМЛЕННЯ ТА ВІДБИТТЯ ПРОМЕНІВ

ОПТИЧНОЮ СИСТЕМОЮ

Мета роботи

1. Ознайомитися з основними законами геометричної оптики.
2. Визначити основні параметри заломлюючих систем.

1. Підготовка до роботи

Вивчити за рекомендованою літературою наступні питання:

1. Основні закони геометричної оптики.
2. Визначення кутів в трикутниках.
3. Теорема синусів.

2. Теоретичні відомості

Заломлення променів сферичною поверхнею [1-6]

На рисунку 2.1 лінія $AA\zeta$ - оптична вісь деякої центрованої системи, одна із заломлюючих сферичних поверхонь якої з центром в точці C позначено OM . Ця поверхня з радіусом кривизни r розділяє два оптичні середовища з показниками заломлення n і n' . На сферичну поверхню із точки A , що знаходиться на відстані s від вершини поверхні, падає промінь AM під деяким кінцевим кутом S до оптичної осі. Заломлений (спряжений промінь) промінь спрямовується в точку $A\zeta$ під кутом $S\zeta$.

Вважаємо, що s і S відомі, знайдемо координати $s\zeta$ і $S\zeta$ що визначають заломлений промінь.

Кут падіння на сферичну поверхню визначаємо із трикутника AMC за теоремою синусів [1, 3, 6]:

$$\sin(e) = \frac{r-s}{r} \cdot \sin(S) \quad (2.1)$$

Промінь AM заломлюється. Скориставшись теоремою заломлення, отримаємо кут заломлення :

$$\sin(e') = \frac{n}{n'} \cdot \sin(e) \quad (2.2)$$

Визначаємо кут φ (*із врахуванням знаків для кутів оптичної системи). Із трикутника AMC кут $a = 180 - ((-s) + j) = 180 + s - j$. Кут α є суміжним із кутом $-e$, тому $a = 180 - (-e)$.

Тоді

$$180 + s - j = 180 + e \Rightarrow j = s - e \quad (2.3)$$

Із трикутника MCA' зовнішній кут $j = -e' + s'$. Прирівнявши праві частини виразів для кута ϕ , звідки знаходимо:

$$s' = s + e' - e \quad (2.4)$$

Використовуючи теорему синусів, із трикутника MCA' , знаходимо:

$$\frac{s' - r}{\sin(-e')} = \frac{r}{\sin(s')}, \quad (2.5)$$

Звідки відстань від заломлюючої поверхні до спряженої точки A' [1, 3, 6]:

$$s' = r - r \cdot \frac{\sin(e')}{\sin(s')} \quad (2.6)$$

На рисунку 2.1 кути позначаємо з урахуванням правила знаків.

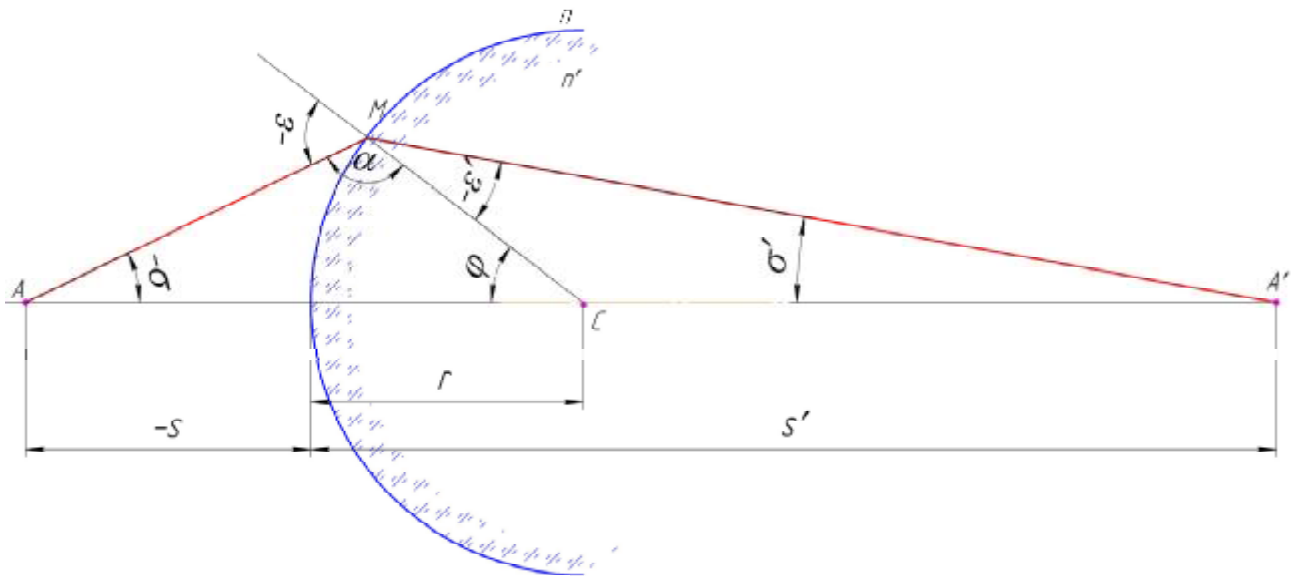


Рисунок 2.1 – Заломлення променя сферичною поверхнею

2.2 Заломлення променів призмою [1-6]

Заломлюючою призмою називається оптична деталь, що обмежена двома заломлюючими непаралельними площинами. Лінія перетину заломлюючих площин (ребро двохгранного кута) називається **заломлюючим ребром** призми, а площина, перпендикулярна заломлюючому ребру, - **головним перетином** призми.

Заломлююча призма характеризується заломлюючим кутом θ , тобто кутом між площинами призми, і показником заломлення n матеріалу, із якого вона виготовлена. Кут призми вважається додатним, якщо його вершини спрямована догори.

Розглянемо хід променя в головному перетині призми (рисунок 2.2).

Проходячи крізь призму, промінь відхилиться від початкового напрямку на кут ω , який називається **кутом відхилення**. Початком відліку кута ω є

напрямок падаючого променя. Якщо призма знаходиться в повітрі, то $n_1 = n_3 = 1.0$; $n_2 = n$.

Використовуючи закон заломлення і враховуючи геометричні співвідношення, кут відхилення променя визначається за формулою [1, 3, 6] (* без врахування знаків кутів оптичної системи):

$$\sin(e'_1) = \frac{1}{n} \cdot \sin(e_1); \quad e_2 = q - e'_1; \quad (2.7)$$

$$\sin(e'_2) = n \cdot \sin(e_2); \quad w = e_1 - e'_1 + e'_2 - e_2 = e_1 + e'_2 - q$$

Із формули (2.7) видно, що кут відхилення залежить від показника заломлення, тому при проходженні через призму світлового променя складного спектрального складу спостерігається дисперсія світла.

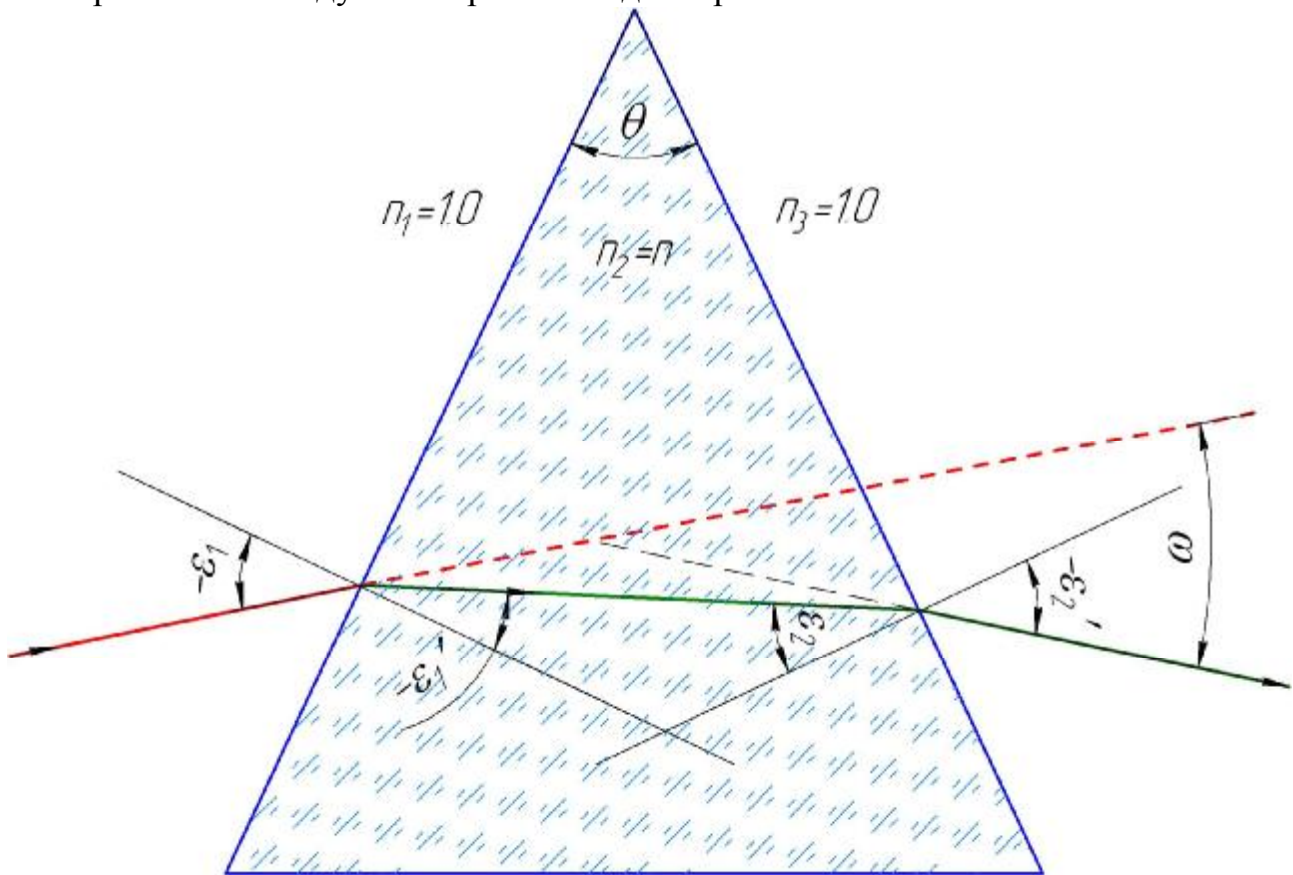


Рисунок 2.2 – Хід променя в заломлюючій призмі

2.3 Відбиття променів сферичною поверхнею [1, 3, 6]

Відбиття променів від сферичної поверхні розглядаємо як частковий випадок заломлення при умові, що $n' = -n$. На рисунку 2.3 показано ввігнута сферична поверхня з радіусом кривизни $-r$. Із точки A , що знаходиться на відстані $-s$ від вершини поверхні, падає промінь AM під кінцевим кутом $-s$ до оптичної осі. Необхідно знайти положення відбитого променя, тобто кут $s\zeta$ та відрізок $s\zeta$

Хід променя розраховуємо так як п. «Заломлення променів сферичною поверхнею». За формулою (2.1) розраховуємо кут падіння на відбиваючу поверхню [1, 3, 6]:

$$\text{Sin}(e) = \frac{r-s}{r} \cdot \text{Sin}(s)$$

Із закону відбиття маємо $e' = -e$.

Кут φ є зовнішнім кутом трикутника АМС, тому:

$$j = s - e \tag{2.8}$$

Визначаємо знак кута. Використовуємо 6 правило знаків, отримаємо, що кут φ від'ємний.

Визначаємо кут s' за формулою (* із урахуванням знаків кутів оптичної системи) знаходимо:

$$s' = s + e' - e = s + 2 \cdot e' \tag{2.9}$$

Визначаємо знак кута. Використовуємо 1 правило знаків, отримаємо, що кут s' від'ємний.

Використовуючи теорему синусів, із трикутника МСА', знаходимо [1, 3, 6]:

$$\frac{s' - r}{\text{Sin}(-e')} = \frac{r}{\text{Sin}(s')}$$

Звідки відстань до спряженої точки [1, 3, 6]:

$$s' = r - r \cdot \frac{\text{Sin}(e')}{\text{Sin}(s')}$$

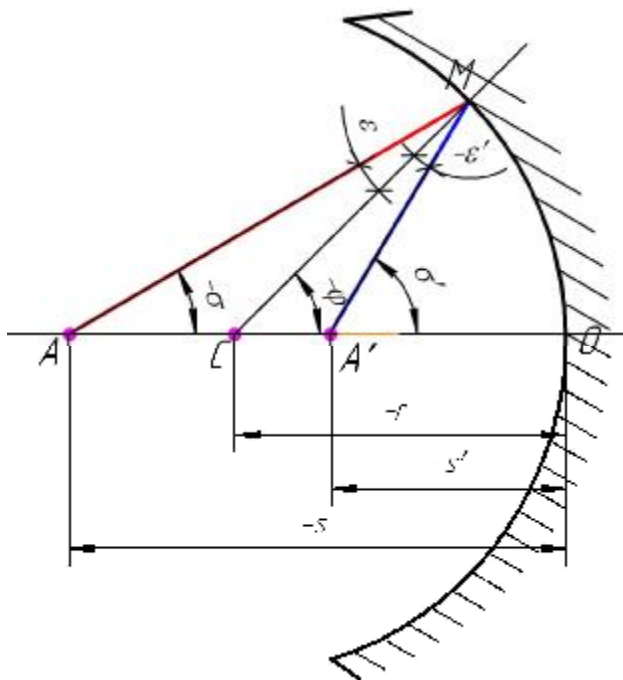


Рисунок 2.3 - Відбиття променя від ввігнутого сферичного дзеркала

3. Виконання роботи

Завдання 1. Заломлення променів сферичною поверхнею

Знайти координати s' і s' , що визначають заломлений промінь.

	варіант	1	2	3	4	5	6
вихідні дані	$-s, \text{ мм}$	15	18	22	25	29	32
	$-s, \text{ градус}$	20	22	20	22	23	25
	$r, \text{ мм}$	10	12	15	17	20	25
	матеріал	СТК9	СТК12	СТК19	КФ4	КФ6	СТК9
розрахункові результати							
	$e, \text{ градус}$						
	$e', \text{ градус}$						
	$j, \text{ градус}$						
	$s', \text{ градус}$						
	$s', \text{ мм}$						

Приклад 2.1

Дано $-s = 45 \text{ мм}$ і $-s = 25,43^\circ$ $r = 43 \text{ мм}$ знайти координати $s\zeta$ і $s\zeta$ що визначають заломлений промінь.

Рішення

1. Із трикутника АМС за теоремою синусів знаходимо:

$$\sin(e) = \frac{r-s}{r} \cdot \sin(s) = \frac{43 - (-45)}{43} \cdot \sin(-25.43) \Rightarrow e = -61^\circ 49'$$

2. Скориставшись теоремою заломлення, отримаємо:

$$\sin(e') = \frac{n}{n'} \cdot \sin(e) = \frac{1}{1.65} \cdot \sin(-61.49) \Rightarrow e' = -32^\circ 18'$$

3. Визначаємо кут ϕ (*із врахування знаків для кутів оптичної системи). Із трикутника АМС кут $a = 180 - ((-s) + j) = 180 + s - j$. Кут α є суміжним із кутом $-e$, тому $a = 180 - (-e)$.

Тоді

$$180 + s - j = 180 + e \Rightarrow j = s - e$$

$$j = s - e = -25^\circ 43' - (-61^\circ 49') = 36^\circ 06'$$

Із трикутника МСА' зовнішній кут $j = -e' + s'$. Прирівнявши праві частини виразів для кута ϕ , звідки знаходимо:

$$s' = s + e' - e,$$

$$s' = s + e' - e = (-25^\circ 43') + (-32^\circ 18') - (-61^\circ 49') = 4^\circ 28'$$

4. Використовуючи теорему синусів, із трикутника МСА', знаходимо:

$$\frac{s' - r}{\sin(-e')} = \frac{r}{\sin(s')}$$

5. Звідки відстань від заломлюючої поверхні до спряженої точки А':

$$s' = r - r \cdot \frac{\sin(e')}{\sin(s')} = 349.77 \text{ мм.}$$

На рисунку 2.4 кути позначаємо з урахуванням правила знаків.

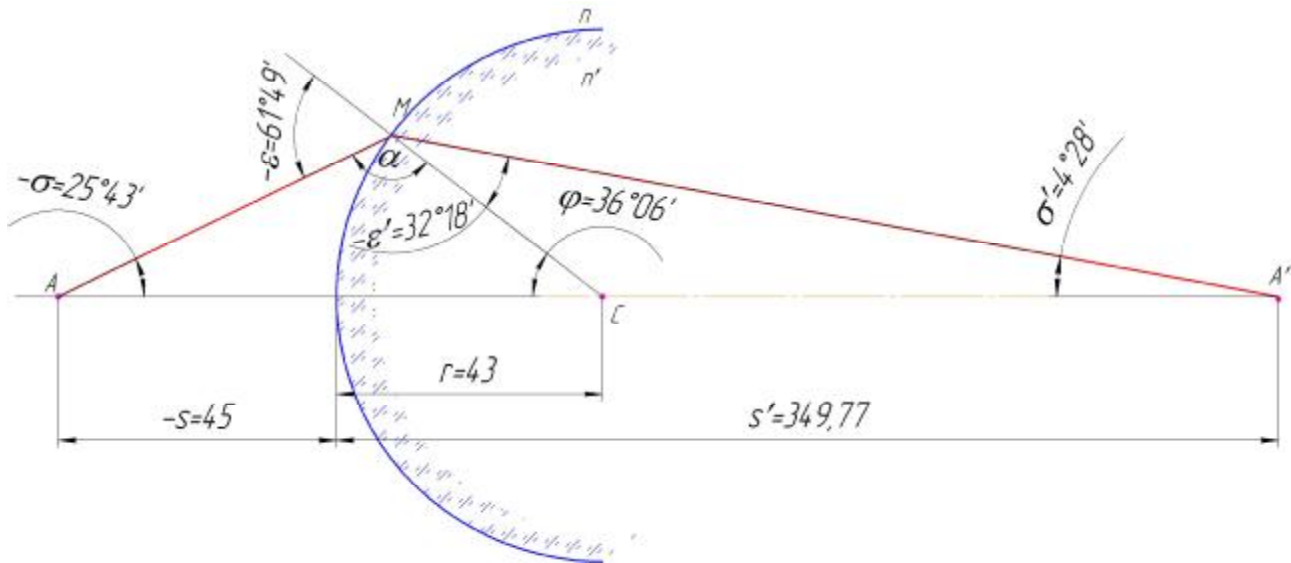


Рисунок 2.4 – Заломлення променя сферичною поверхнею

Завдання 2. Заломлення променів призмою

Розрахувати кут ω відхилення променя призмою.

	варіант	1	2	3	4	5	6
вихідні дані	e_1 , градус	55	58	61	63	65	32
	n	БФ11	БФ12	БФ13	БФ16	БФ21	БФ11
розрахункові результати	e'_1 , градус						
	e'_2 , градус						
	g , градус						
	a , градус						
	b , градус						
	w , градус						

Приклад 2.2

Заломлюючись на двох гранях трикутної призми, промінь відхиляється до її основи. Розрахувати кут w відхилення променя призмою, якщо відомі кут падіння e_1 і показник заломлення матеріалу призми n .

Рішення

1. Невідомий кут ω є суміжним кутом для $\angle ACB = \angle b$

$$w = 180 - b \Rightarrow 108 - (180 - ((e_1 - e'_1) + (e'_2 - e_2))) = (e_1 - e'_1) + (e'_2 - e_2).$$

2. Кут $b = 180 - (a + g) \Rightarrow 180 - ((e_1 - e'_1) + (e'_2 - e_2))$.

3. Кут $a = e_1 - e'_1$.

4. Кут $g = e'_2 - e_2$.

5. При цьому кути заломлення e'_1, e'_2 визначаються за формулами (2.7) закону заломлення променів.

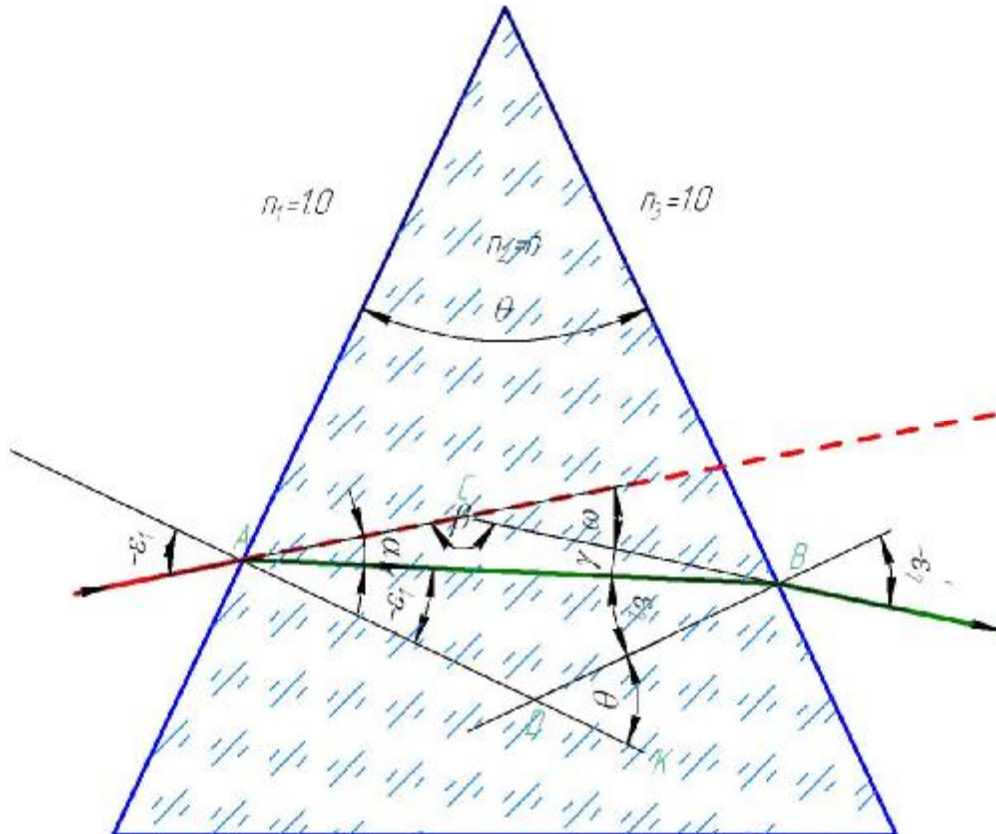


Рисунок 2.5 – Заломлення променів призмою

Завдання 3. Відбиття променів сферичною поверхнею

Знайти координати s та s' відбитого променя.

варіант	Вихідні дані			Розрахункові результати			
	$-s,$ мм	$-S,$ градус	$-r,$ мм	e $e' = -e$	$-j,$ градус	$-s',$ градус	$-s',$ мм
1	44	34	32				
2	45	35	34				
3	46	30	36				
4	47	31	38				
5	48	32	40				
6	49	33	42				

Приклад 2.3

Дано $-s = 45 \text{ мм}$, $-s = 30^\circ$, $-r = 30 \text{ мм}$ знайти координати $s\zeta$ і $s\zeta'$ що визначають відбитий промінь.

Рішення

1. Хід променя розраховуємо так як п. «Заломлення променів сферичною поверхнею». За формулою (2.1) розраховуємо значення:

$$\sin(e) = \frac{r-s}{r} \cdot \sin(s) = \frac{-30 - (-45)}{-30} \cdot \sin(-30^\circ) \Rightarrow e = 14^\circ 47'.$$

2. Із закону відбиття маємо:

$$e' = -e \Rightarrow -14^\circ 47'.$$

3. Кут ϕ є зовнішнім кутом трикутника АМС, тому:

$$j = s - e = -30^\circ - 14^\circ 47' = -44^\circ 47'.$$

Визначаємо знак кута. Використовуємо 6 правило знаків, отримаємо, що кут ϕ від'ємний.

4. Визначаємо кут s' (* із урахуванням знаків оптичної системи) знаходимо:

$$s' = s + e' - e = s + 2 \cdot e' = (-30) + 2 \cdot (-14^\circ 47') = -59^\circ 35'.$$

Визначаємо знак кута. Використовуємо 1 правило знаків, отримаємо, що кут s' від'ємний.

5. Використовуючи теорему синусів, із трикутника МСА', знаходимо:

$$\frac{s' - r}{\sin(-e')} = \frac{r}{\sin(s')}.$$

6. Звідки відстань до спряженої точки:

$$s' = r - r \cdot \frac{\sin(e')}{\sin(s')} = -21.28 \text{ мм}.$$

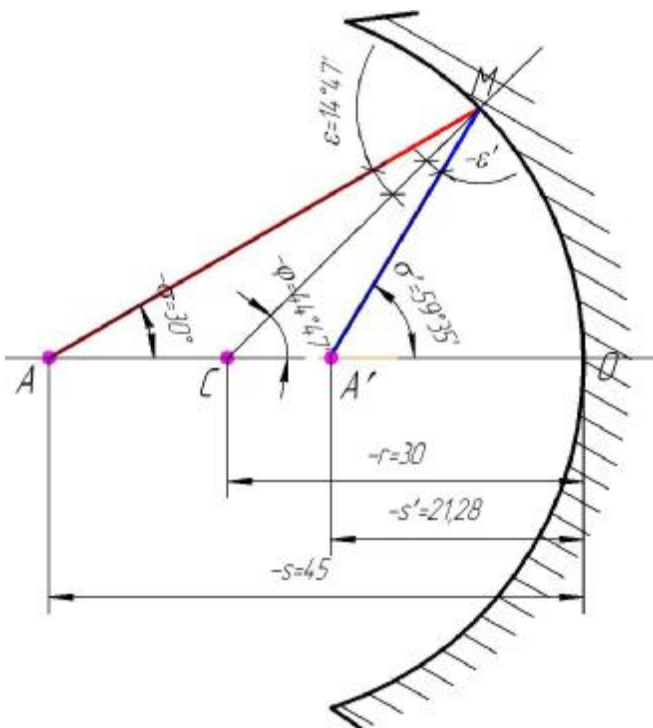


Рисунок 2.6 - Відбиття променя від ввігнутого сферичного дзеркала

Контрольні питання для перевірки кінцевого рівня знань

1. Заломлення променів сферичною поверхнею. Основні параметри оптичної системи.
2. Побудувати хід променя при заломленні сферичною поверхнею.
3. Визначення знаків для кутів оптичної системи.
4. Основні параметри заломлюючої призми.
5. Побудувати хід променя при заломленні призмою.
6. Відмінність між відбиваючою та заломлюючою сферичною поверхнею.

Література

1. Гвоздева И.П., Коркина К.И. Прикладная оптика и оптические измерения –М.: Машиностроение, 1976.
2. Справочник конструктора оптико - механических приборов / В.А. Панов, М.Я. Кругер, В.В. Кулагин и др.; Под общ. ред.. В.А. Панова, -Л.: Машиностроение, Ленингр. отд., 1980. – 742 с, ил.
3. Прикладная оптика: Учебн. пособие для приборостроительных специальностей вузов / Л.Г. Бебчук, Ю.В. Богачев, Н.П. Заказнов и др.; Под общ. ред. Н.П. Заказнова. – М.: Машиностроение, 1988. – 312 с.
4. Ландсберг Г.С. Оптика. Учебн. пособие: для вузов – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. – 848 с.
5. Стафеев С.К., Боярский К.К., Башина Г.А. Основы оптики: Учебное пособие. – СПб.: Питер, 2006. – 336 с.
6. Заказнов Н.П. Теория оптических систем: Учебник для студентов приборостроительных специальностей вузов / Н.П. Заказнов, С.И. Кирюшин, В.Н. Кузичев. – М.: Машиностроение, 1992. – 448 с.

ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ №1.3 ВОЛОКОННА ОПТИКА

Мета роботи

1. Ознайомитися з принципом розповсюдження світла в оптоволоконні.
2. Підібрати джерело та приймач оптичного випромінення. Розрахувати оптоволоконний датчик.

1. Підготовка до роботи

Вивчити за рекомендованою літературою наступні питання:

1. Основні закони геометричної оптики.
2. Закон повного внутрішнього відбиття світла.
3. Конструкції оптоволоконних датчиків.

2. Теоретичні відомості

2.1 Принцип розповсюдження світла по оптоволоконні [3-4]

Оптичне волокно, як показано на рисунку 3.1, складається із осердя, по якому розповсюджується світло, і оболонки. Остання, в свою чергу, знаходиться в плетінні, яке захищає поверхню волокна, підвищує його міцність і тим самим спрощує експлуатацію.

Процеси, що проходять в плоскому діелектричному хвильоводі, інтерпретуються на основі геометричної оптики, яка по необхідності доповнюється більш загальною хвильовою оптикою.

В основі транспортування світлового променя по світловоду лежить явище його повного внутрішнього відбиття від границі розділу з більш оптично щільного до менш оптично щільного середовища.

Світло із середовища з показником заломлення n (зазвичай повітря) потрапляє в осердя з показником заломлення n_1 і піддається повному внутрішньому відбиттю на границі з оболонкою, яка має показник заломлення n_2 .

Критичний кут, при якому має місце *повне внутрішнє відбиття* виражається формулою:

$$\text{Sin}(a_{кр}) = \frac{n_2}{n_1} \quad (3.1)$$

Коефіцієнт заломлення n_1 осердя лише незначно перевищує коефіцієнт заломлення n_2 оболонки, тому світло, що введене в осердя з торця волокна, повністю відбивається від границі розділу осердя і оболонки, начеб то закривається в осерді і розповсюджується тільки в ньому.

Для **повного внутрішнього відбиття** світла, що входить в волокно під кутом θ , необхідно, щоб виконувалась умова [3]:

$$0 \leq \theta \leq \text{arcSin}(\sqrt{n_1^2 - n_2^2}) = \theta_{\max} \quad (3.2)$$

Промені світла, що падають на границю розділу під кутом меншим критичного, потрапляють в оболонку і в подальшому поглинається покриттям (захисною оболонкою). Промені світла, що прийшли до границі розділу під кутом більшим критичного, повністю відбиваються, постійно повторюючись, що забезпечує розповсюдження випромінювання вздовж світловоду.

Виходячи із закону заломлення критичний кут може бути зв'язаний з кутом падіння променя в осердя наступною залежністю [3]:

$$\begin{aligned} n \cdot \text{Sin}(\Theta) &= n_1 \cdot \text{Sin}(90^\circ - a_{\text{кр}}) = n_1 \cdot \text{Cos}(a_{\text{кр}}) = n_1 \cdot \sqrt{1 - \text{Sin}^2(a_{\text{кр}})} = \\ &= n_1 \cdot \sqrt{1 - \frac{n_2^2}{n_1^2}} = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \end{aligned} \quad (3.3)$$

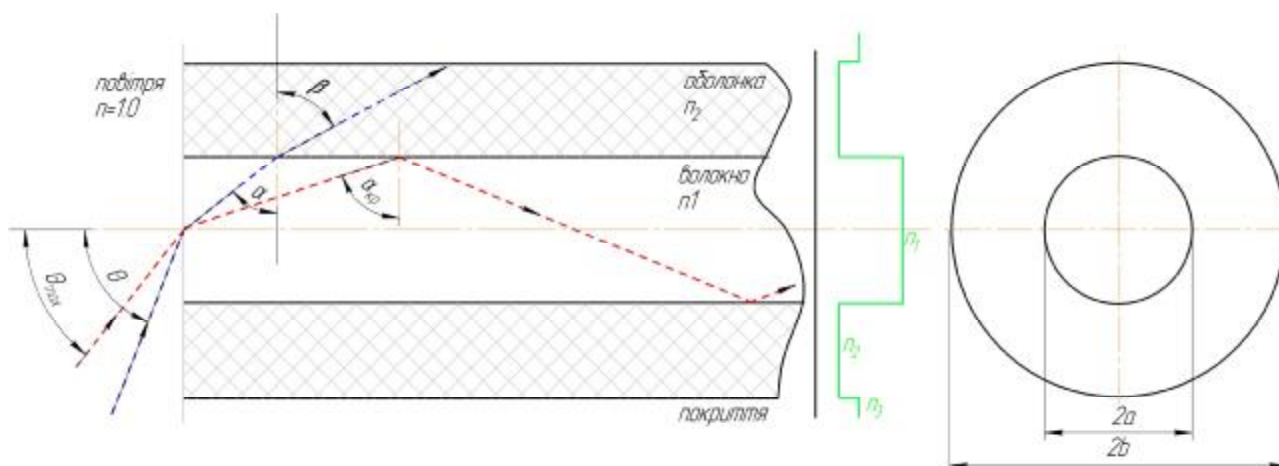


Рисунок 3.1 – Типова структура оптичного волокна і розповсюдження світла в ньому (суцільною лінією показано промінь, який після заломлення виходить із волокна через оболонку; штрихова лінія зображує промінь, що має повне внутрішнє відбиття всередині волокна)

Оскільки різниця між коефіцієнтами заломлення в осерді і оболонці лежить в межах 0,01, то величину θ_{\max} можна представити в наступному вигляді [3]:

$$\theta_{\max} \approx \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad (3.4)$$

Кут θ_{\max} – це максимально можливий кут, під яким світло може проходити в оптичне волокно, тобто прийматися ним, називається числовою апертурою і позначається NA (Numerical Aperture) [3]

При розгляді оптичних волокон замість різниці n_1 і n_2 частіше всього користуються величиною, що називається відносною різницею коефіцієнтів заломлення:

$$\Delta = \frac{n_1^2 - n_2^2}{2 \cdot n_1^2} \approx \frac{n_1 - n_2}{n_2} \quad (3.5)$$

2.2 Волоконно-оптичні датчики в медицині [4]

Волоконно-оптичні датчики за характером використання оптичного волокна розділяються на два типи:

1. в яких волокно слугує тільки для передачі сигналів;
2. в яких волокно є власне чутливим елементом.

Волоконно-оптичні датчики, в яких оптичне волокно слугує лінією для розповсюдження світла, розділяють на датчики з оптичним перетворенням і датчики з оптичним зондом.

Датчик з оптичним перетворенням (рисунок 3.2 а) являє собою систему, що містить оптичний матеріал або чутливий до механічної дії оптичний елемент, який перетворює зміну параметрів зовнішнього середовища в зміну параметрів світлового променя.

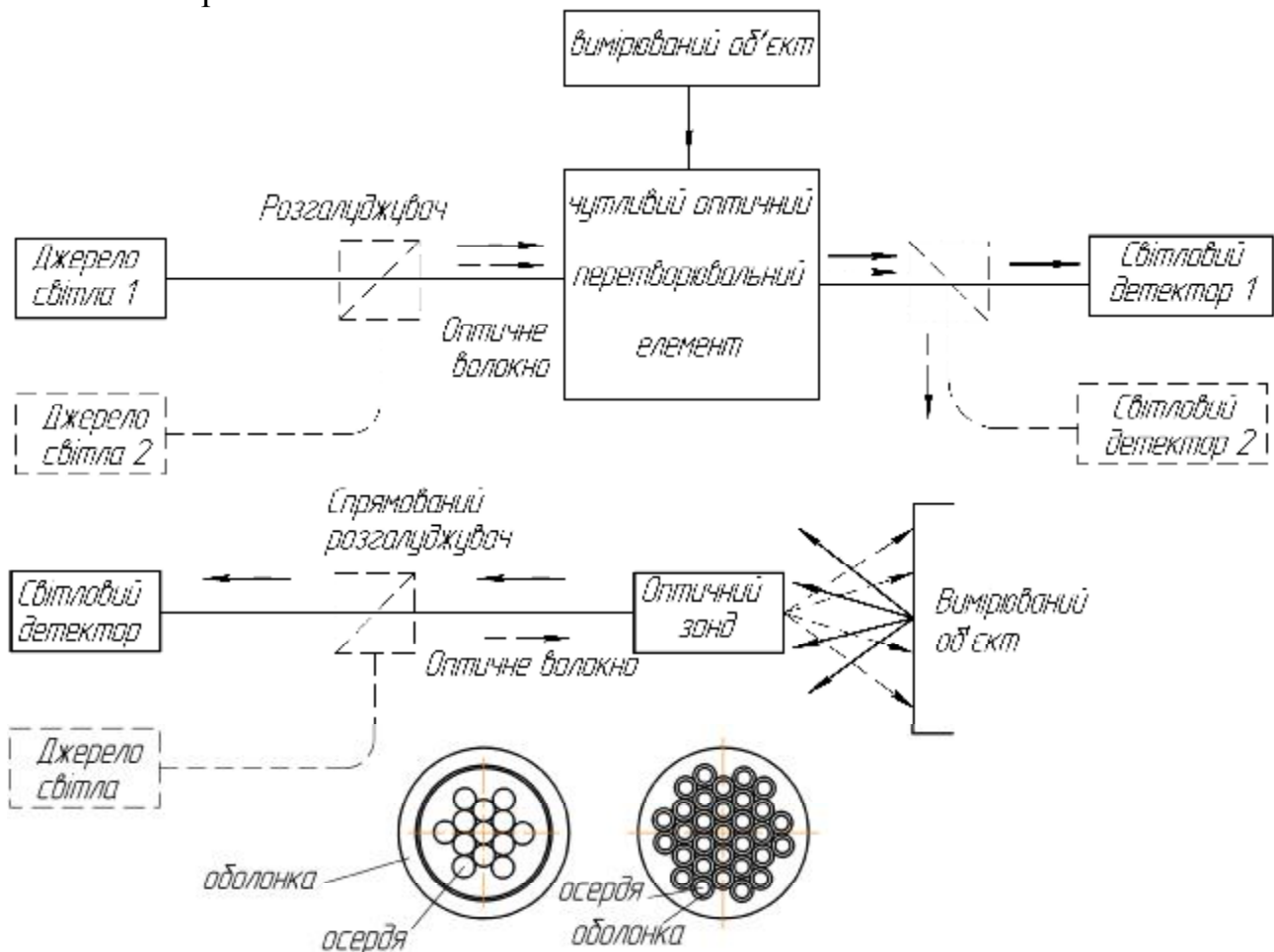


Рисунок 3.2 – Схеми датчиків: а) з оптичним перетворювачем; б) з оптичним зондом [4]

Перетворювач розташований між торцями передаючого і приймаючого волокна. Використовуються багатомодові волокна і пучки волокон. В якості джерела світла частіше за все використовують світлодіоди з малими шумами, а в якості детектора світла – рпн – фотодіоди, що мають термостабільні характеристики. Датчики цієї системи прості по конструкції і, як правило, високо надійні.

Схема датчика з зондом із оптичного волокна приведена на рисунку 3.2 б. Тут світлова інформація, випромінююча, відбита або розсіяна об'єктом вимірювання, виділяється за допомогою сенсорної головки, що складається із відповідного об'єктиву і оптичного волокна, і поступає в світловий детектор. Використовуються різні оптичні волокна (одномодові, багатомодові), а також волоконні пучки (жгути). Волоконні пучки представляють собою кабель із множини оптичних волокон або конструкцію із множини осердя з загальною оболонкою (рисунок 3.2). В будь якому випадку загальний діаметр оптоволоконної конструкції – в межах 10 мм. При цьому в багатоосердевому волокні діаметр кожного осердя складає 4-12 мкм, а в волокні типу багатожилкового кабелю кожне оптичне волокно має діаметр 14-30 мкм, тому щільність елементів зображення в першому вища.

Датчик тиску із відбивною діафрагмою[4]

На рисунку 3.3 представлена структурна схема датчика тиску, в якому використовується зміна діафрагмою умов відбиття світла. Волоконно-оптичний джгут складається із передаючих і приймаючих волокон. Світло, що вводиться в передаючі волокна, відбивається діафрагмою. При цьому коефіцієнт зв'язку між передаючими і приймаючими волокнами змінюється у відповідності з положенням діафрагми, яка в свою чергу залежить від тиску. Датчик тиску використовується в діапазоні, де залежність інтенсивності світла від зазору порівняно лінійна. Опубліковані відомості про датчик тиску, в якому використовуються джгут діаметром 2 мм із 100 оптичних волокон і діафрагма із нержавіючої сталі товщиною 15 мкм. Цим датчиком вимірюють тиск до $2,7 \cdot 10^4$ Па. Подібні датчики використовують для вимірювання тиску рідких середовищ, наприклад тиску крові.

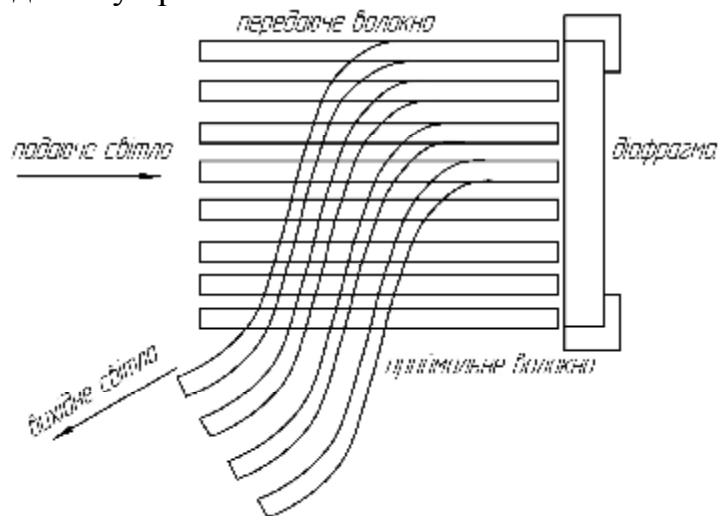


Рисунок 3.3 – Датчик тиску із відбивною діафрагмою [4]

3. Виконання роботи

Завдання 1. Розрахунок датчику тиску із відбивною діафрагмою

Варіант	Діапазон вимірювання тиску, Па		Довжина хвилі джерела, I_{\max} , мкм	Коефіцієнт заломлення волокна	Δ , %	Відстань l , мм
	min	max				
1	$0.5 \cdot 10^4$	$3 \cdot 10^4$	0,92	1,45	1	1
2	$0.65 \cdot 10^4$	$2.75 \cdot 10^4$	0,95	1,47	1,5	1,25
3	$0.52 \cdot 10^4$	$2.57 \cdot 10^4$	0,88	1,5	2	1,5
4	$0.45 \cdot 10^4$	$2.78 \cdot 10^4$	0,81	1,52	1	1,75
5	$0.59 \cdot 10^4$	$2.71 \cdot 10^4$	0,96	1,55	1,5	2
6	$0.47 \cdot 10^4$	$2.86 \cdot 10^4$	0,85	1,61	2	2,25

Приклад 3.1

Дано: світловолоконний жгут діаметром 2 мм; кількість волокон 100 шт; максимальний вимірюваний тиск $2.7 \cdot 10^4$ Па; товщина діафрагми 150 мкм; матеріал діафрагми нержавіюча сталь. Всі інші дані необхідні для розрахунку вибрати самостійно із конструктивних міркувань.

Рішення

1. Виконуємо підбір джерела і приймача випромінювання за спектральним діапазоном, випромінюючою потужністю та спектральною чутливістю приймача.

В якості джерела випромінювання вибираємо світло діод АЛ 124 для якого:

- довжина хвилі $I_{\max} = 0.85$ мкм;
- потужність випромінювання 4 мВт.

За спектральними характеристиками підбираємо фотодіод ФД-256 для якого:

- довжина хвилі $I_{\max} = (0.75 - 0.9)$ мкм;
- темновий струм $I_T = 0,005$ мА;
- спектральна чутливість $S_I = 6$ мА/лм.

2. Сердечник оптичного волокна має коефіцієнт заломлення 1,47, а відносна різниця коефіцієнтів заломлення $\Delta=1\%$.

Розраховуємо числову апертуру оптичного волокна:

$$NA = n_1 \cdot \sqrt{2 \cdot \Delta} = 1.47 \cdot \sqrt{2 \cdot 0.01} = 0.21.$$

Визначаємо кута Θ , під яким світловий потік входить в світловод:

$$0 \leq q \leq \arcsin(\sqrt{n_1^2 - n_2^2}) = q_{\max},$$

$$0 \leq q \leq \arcsin(\sqrt{1.47^2 - 1.455^2}) = 12.09^\circ.$$

Для визначення кута Θ , під яким світловий потік входить в світловод необхідно знати показник заломлення n_2 . Визначаємо його із формули:

$$\Delta = \frac{n_1^2 - n_2^2}{2 \cdot n_1^2} \approx \frac{n_1 - n_2}{n_2} \Rightarrow$$

$$n_2 = \sqrt{n_1^2 - 0.01 \cdot 2 \cdot n_1^2} = \sqrt{1.47^2 - 0.01 \cdot 2 \cdot 1.47^2} = 1.455.$$

3. Оскільки світловий промінь проходить із середовища з меншим показником заломлення в середовище з більшим показником, то цей промінь піддається заломленню. Визначаємо кут заломлення променя, що падає на границю розділу повітря світловод. Використовуємо закон заломлення променів:

$$\frac{\sin(e)}{\sin(e')} = \frac{n'}{n} \Rightarrow$$

$$e' = \arcsin\left(\frac{n \cdot \sin(e)}{n'}\right) = \arcsin\left(\frac{1 \cdot \sin(12^\circ)}{1.47}\right) = 8^\circ 13'.$$

*В цьому випадку кут падіння e відповідає куту Θ .

Промінь, що розповсюджується в світловоді піддається повному внутрішньому відбиттю від оболонки волокна, оскільки показник заломлення оболонки менший за показник заломлення сердечника. Тому промінь, що заломився на поверхні розділу повітря-сердечник буде відбиватися від поверхні сердечник-оболонка.

Проводимо нормаль до точки падіння променя. Визначаємо кут падіння із прямокутного трикутника від складає $81^\circ 50'$. Промінь вийде із волокна під таким же кутом, що і ввійшов, тобто $12^\circ 10'$ (рисунок 3.4).

4. Оскільки довжина хвилі джерела випромінення відноситься до невидимої області спектру, тому для розрахунку використовуємо **енергетичну систему одиниць**.

Визначаємо енергетичну освітленість об'єкту вимірювання:

$$E_e = \frac{\Phi_e}{S_2} = \frac{I_e \cdot \cos(\alpha)}{l^2};$$

$$\begin{aligned} E_{e \min} &= \frac{\Phi_e}{S_2} = \frac{I_e \cdot \cos(\alpha)}{(l - d_{A \min})^2} = \frac{F \cdot \cos(\alpha)}{(l - d_{A \min})^2 \cdot w} = \\ &= \frac{4 \cdot 10^{-3} \cdot \cos(12^\circ 10')}{(1 \cdot 10^{-3} - 9.823 \cdot 10^{-6})^2 \cdot 4 \cdot p} = 321.383 \frac{Bm}{m^2}, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} E_{e \max} &= \frac{\Phi_e}{S_2} = \frac{I_e \cdot \cos(\alpha)}{(l - d_{A \max})^2} = \frac{F \cdot \cos(\alpha)}{(l - d_{A \max})^2 \cdot w} = \\ &= \frac{4 \cdot 10^{-3} \cdot \cos(12^\circ 10')}{(1 \cdot 10^{-3} - 2.554 \cdot 10^{-5})^2 \cdot 4 \cdot p} = 331.834 \frac{Bm}{m^2}. \end{aligned}$$

де I_e – енергетична сила світла, $I_e = \frac{F}{w} = 3.183 \cdot 10^{-4} \frac{Вт}{ср}$;

l – відстань від джерела до площадки, м;

α - кут під яким промені падають на площадку.

Як видно із формули енергетична освітленість залежить від відстані до джерела випромінення. Оскільки втрати в світловолокні досить малі, тому можна вважати, що потік випромінення повністю без втрат передається від джерела випромінення до кінця світловоду. Тому в формулі відстань l приймаємо від торця світловоду до об'єкту контролю. Ця відстань буде змінюватися в залежності від тиску, що діє на мембрану. Тому необхідно попередньо розрахувати статичну функцію перетворення пружної мембрани, тобто встановити залежність прогину мембрани від діючого тиску.

5. Розраховуємо діафрагму рисунка 3.5.

Приймаємо початкову відстань $l = 1 \text{ мм}$. Під дією тиску мембрана вигинається, і її максимальне переміщення буде в центрі, визначаємо за формулою:

$$d_A = \frac{3 \cdot (1 - \mu^2) \cdot R^2}{16 \cdot E \cdot h^2} \cdot P,$$

де μ - коефіцієнт Пуассона ($\approx 0,28-0,3$);

E – модуль пружності матеріалу мембрани (193-200 ГПа); нержавіюча сталь AISI 304 (08X18H10), AISI 316 (03X17H14M2), AISI 321 (08X18H10T), AISI 409 (08X13), AISI 430 (08X17); Н – нікель, Х – хром, Т – титан, К – кобальт, М – молібден, В – вольфрам, Д – мідь, Г – марганець, С – кремній;

R – радіус діафрагми 5 мм;

h – товщина діафрагми 150 мкм.

Результат розрахунку $d_{A_{\max}} = 0.0254 \text{ мм}$, $d_{A_{\min}} = 0,009823 \text{ мм}$.

6. Оскільки поверхня діафрагми гладка, майже дзеркальна, тому вона відбиває промені від поверхні з коефіцієнтом відбиття $r = 0,98$. Тоді яскравість відбитого променя визначається:

$$B_{\text{поверхні}} = r \cdot \frac{E_{e_{\min}}}{\rho} = 0,98 \cdot \frac{321.383}{\rho} = 100.253 \frac{Вт}{ср \cdot м^2},$$

$$B_{\text{поверхні}} = r \cdot \frac{E_{e_{\max}}}{\rho} = 0,98 \cdot \frac{331.834}{\rho} = 103.513 \frac{Вт}{ср \cdot м^2}$$

7. Силу світла цієї ділянки поверхні $I_{\text{нов}}$ визначаємо:

$$I_{\text{нов. min}} = B_{\text{поверхні}} \cdot S = 100.253 \cdot 3.142 \cdot 10^{-6} = 3.15 \cdot 10^{-4} \frac{Вт}{ср},$$

$$I_{\text{нов. max}} = B_{\text{поверхні}} \cdot S = 103.513 \cdot 3.142 \cdot 10^{-6} = 3.252 \cdot 10^{-4} \frac{Вт}{ср}.$$

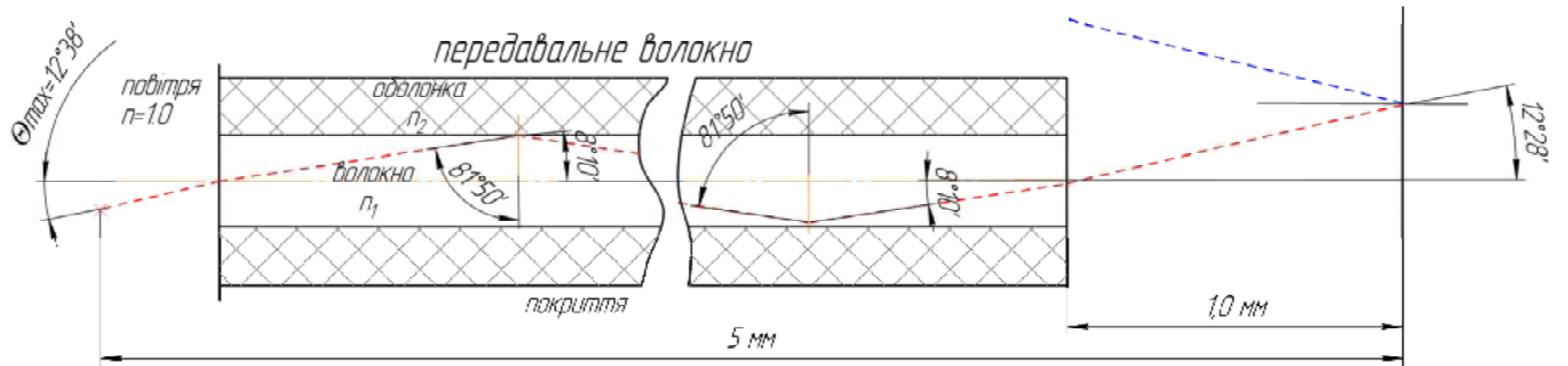


Рисунок 3.4– Хід променів у світловоді

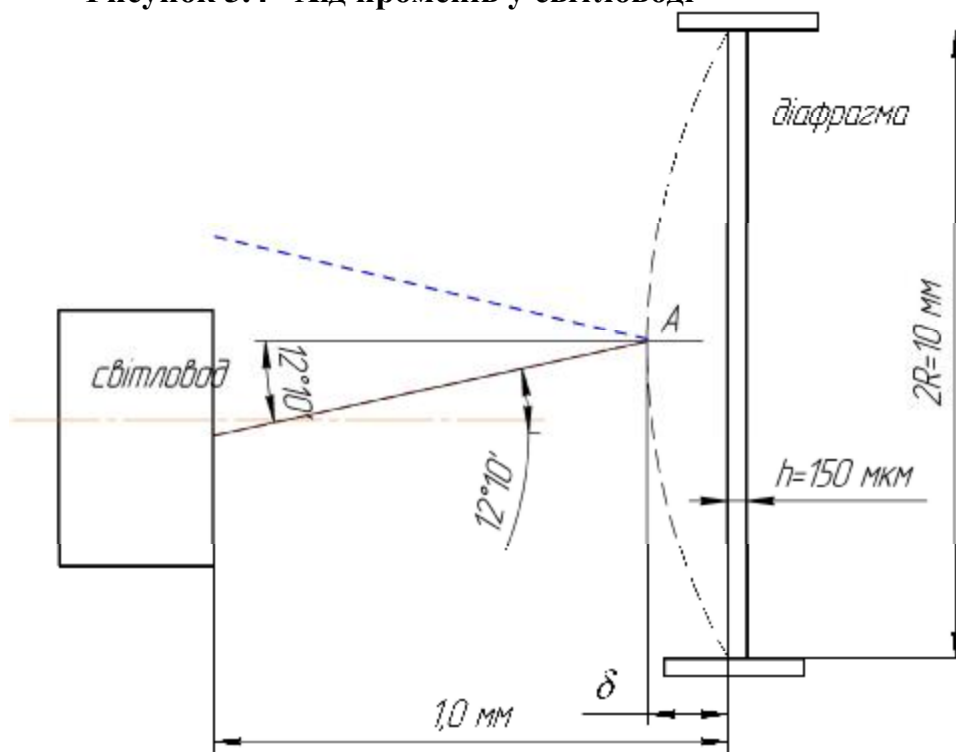


Рисунок 3.5– Деформація діафрагми під дією вимірюваного тиску

8. Тоді світловий потік відбитий від поверхні:

$$F_{нов.мин} = I_{нов} \cdot w = 3.15 \cdot 10^{-4} \cdot 4 \cdot p = 3.95 \cdot 10^{-3} \text{ Вт},$$

$$F_{нов.маx} = I_{нов} \cdot w = 3.252 \cdot 10^{-4} \cdot 4 \cdot p = 4.086 \cdot 10^{-3} \text{ Вт}.$$

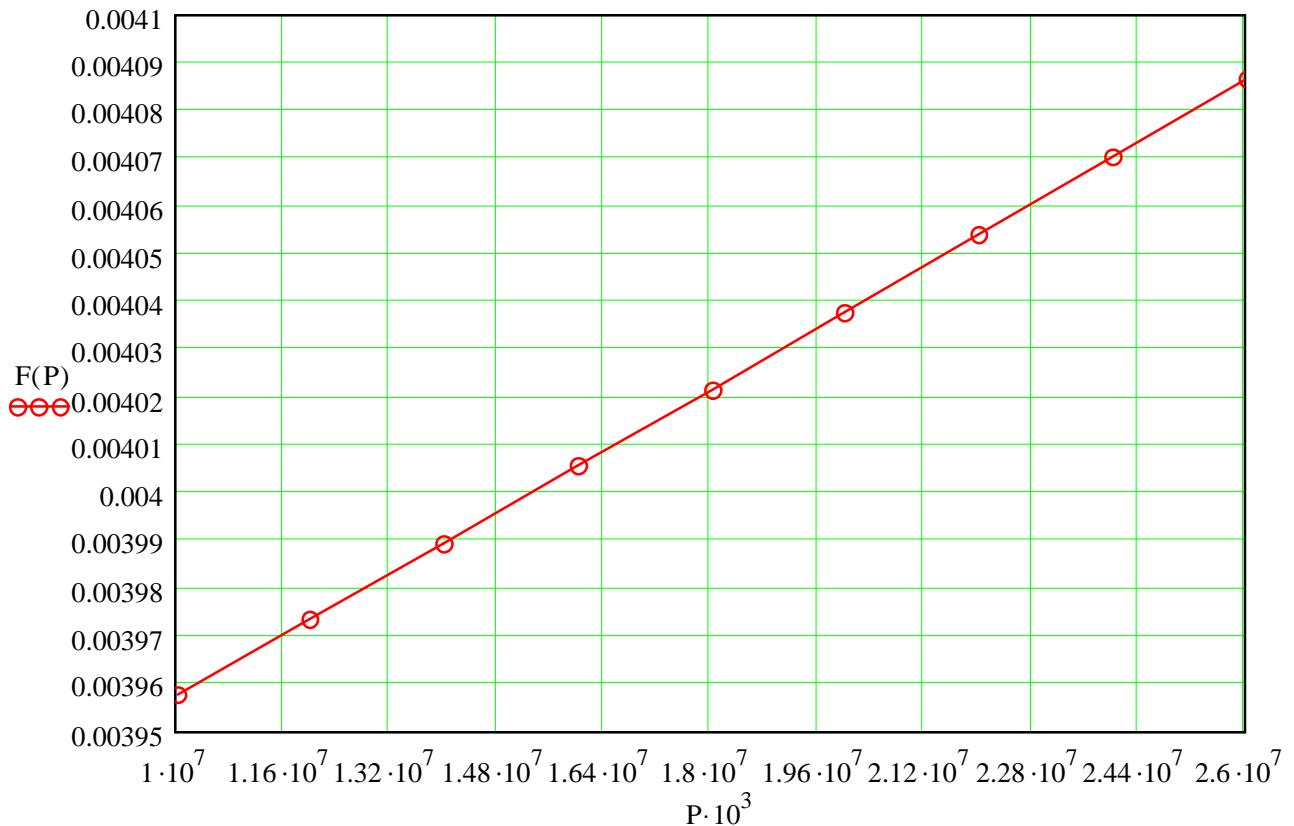


Рисунок 3.6– Результат розрахунку відбитого потоку від поверхні діафрагми

9. Визначаємо фотострум фотодіода:

$$I_F = S_1 \cdot F = 6 \left(\frac{\text{мА}}{\text{лм}} \right) \cdot F_{нов.мин} = 6 \cdot 10^{-3} \cdot 2.703 = 0.01674 \text{ А} = 16.21 \text{ мА},$$

$$I_F = S_1 \cdot F = 6 \left(\frac{\text{мА}}{\text{лм}} \right) \cdot F_{нов.маx} = 6 \cdot 10^{-3} \cdot 2.791 = 0.01674 \text{ А} = 16.74 \text{ мА}.$$

Із довідникових даних маємо, інтегральну чутливість фотоелемента $6 \frac{\text{мА}}{\text{лм}}$.

Невідоме значення потоку, що падає на фотоелемент.

10. Визначаємо потік F через потужність, що освітлює фотоелемент:

$$F = F_{нов.мин} \cdot 683 \left[\frac{\text{лм}}{\text{Вт}} \right] = 3.95 \cdot 10^{-3} \cdot 683 = 2.703 \text{ лм},$$

$$F = F_{нов} \cdot 683 \left[\frac{\text{лм}}{\text{Вт}} \right] = 4.086 \cdot 10^{-3} \cdot 683 = 2.791 \text{ лм}.$$

11. Оскільки фотодіод підключений з зворотнім зміщенням, то струм у ланцюгу визначаємо за формулою:

$$I = I_F + I_S.$$

Темновий струм I_S визначаємо із довідникових даних 0,005 мкА.

Тоді

$$I_{\min} = I_F + I_S = 16.21 \cdot 10^{-3} + 0,005 \cdot 10^{-6} = 0,0162193 \text{ A} ,$$

$$I_{\max} = I_F + I_S = 16.74 \cdot 10^{-3} + 0,005 \cdot 10^{-6} = 0,0167467 \text{ A} .$$

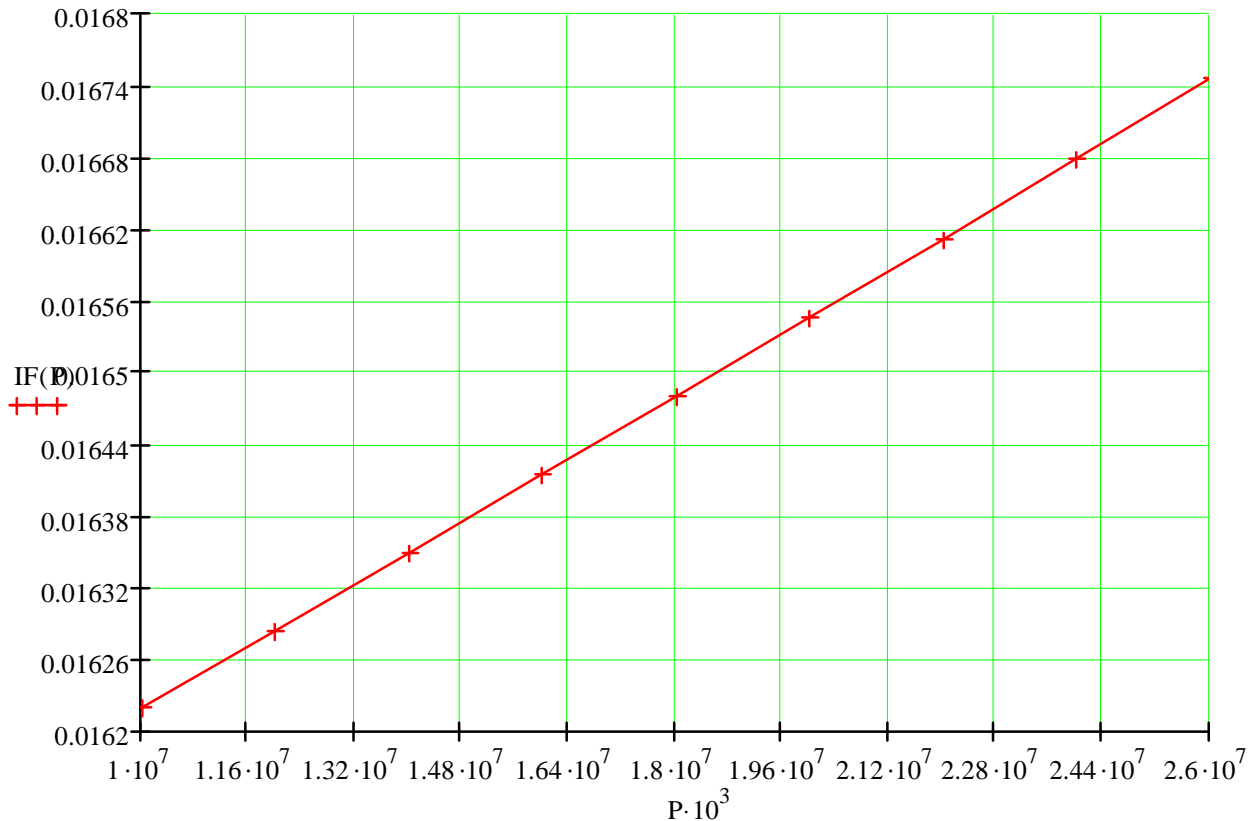


Рисунок 3.7– Залежність фотоструму фотодіода від тиску

Контрольні питання для перевірки кінцевого рівня знань

1. Ендоскопія. Визначення, область використання, способи ендоскопії, класифікація ендоскопів.
2. Види ендоскопічної діагностики.
3. Конструкція та устрій гнучкого ендоскопу.
4. Схема передачі світла та зображення в ендоскопі.
5. Застосування одномодових та багатомодових волоконно-оптичних датчиків в медицині.
6. Схема датчика з оптичним перетворювачем. Вимоги до приймачів та джерел оптичного випромінення.
7. Схема датчика з оптичним зондом. Вимоги до приймачів та джерел оптичного випромінення.
8. Використання енергетичних та світлотехнічних світлових величин.

Література

1. Бутиков Е.И. Оптика: Учебное пособие для вузов / Под ред. Н.И. Калитеевского. – М.: Высш.шк., 1986. – 512 с.
2. Верещагин И.К. и др. Введение в оптоэлектронику: Учеб. пособие для вузов / И.К. Верещагин, Л.А. Косяченко, С.М. Кокин. – М.: Высш.шк., 1991. - 191 с.
- 3 . Волоконно-оптические датчики / Под ред. Т. Окоси: Пер. с япон. – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд., 1990. - 256 с.
4. Медицинские приборы. Разработка и применение. – М.: Медицинская книга, 2004. – 720 с.
5. Техническое руководство по волоконной оптике / Дональд Дж. Стерлинг, мл.; переводчик А. Московченко. – Издательство «ЛЮРИ», 1998.

ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ №1.4 ОПТИЧНІ ДЕТАЛІ ПРИЛАДІВ

Мета роботи

1. Ознайомитися з основними типами лінз.
2. Визначити основні параметри лінзової системи.

1. Підготовка до роботи

Вивчити за рекомендованою літературою наступні питання:

1. Основні кардинальні точки оптичної системи.
2. Типи додатних та від'ємних лінз.
3. Побудова зображення оптичною системою.

2. Теоретичні відомості [1-3, 6]

Лінзою називається оптична деталь, обмежена двома заломлюючими поверхнями. Обмежимося розглядом лінз із сферичними поверхнями. В залежності від знаку задньої фокусної відстані всі лінзи можна розділити на два види:

- додатні, або збираючі, якщо $f' > 0$;
- від'ємні, або розсіюючі, якщо $f' < 0$.

Як збираючі, так і розсіюючі лінзи можна розділити на наступні чотири групи:

1. Лінзи, знаки радіусів кривизни різні. До таких лінз відносяться подвійно випуклі і подвійновигнуті лінзи.

2. Лінзи, що мають одну із заломлюючих поверхонь плоску ($r = \infty$). До них відносяться плоско-випуклі ($r_1 > 0; r_2 = \infty$) і плоско-вигнуті ($r_1 < 0; r_2 = \infty$).

3. Лінзи з радіусами кривизни одного знаку. Такі лінзи називають менісками. Меніски бувають додатні, у яких радіус випуклої поверхні менше по абсолютній величині радіуса вигнутої поверхні, тобто $r_1 > 0; r_2 > 0$ і $r_1 < r_2$, і від'ємні, у яких радіус випуклої поверхні більший, ніж радіус вигнутої поверхні, тобто $r_1 > 0; r_2 > 0$ і $r_1 > r_2$.

4. Концентрична лінза – лінза, у якої центри кривизни поверхонь співпадають.

Знак радіусу кривизни поверхні визначається правилом: радіус кривизни поверхні вважається додатнім, якщо її центр кривизни знаходиться з права від поверхні, а від'ємним – зліва від поверхні.

Конструктивним параметрами лінзи із сферичними поверхнями (одна із яких може бути плоскою) будуть: радіуси сфер r_1, r_2 , товщина по оптичній осі d та показник заломлення n матеріалу лінзи. Скористаємося ними для визначення фокусних відстаней f', f лінзи, її фокальних відрізків S'_F, S_F ,

положення головних площин відносно вершин сферичних поверхонь (відрізки $S'_{H'}$, S_H) та відстані $\Delta_{HH'}$ між головними площинами (головними точками).

Для простої лінзи, що розташована в повітрі, справедливі наступні співвідношення [1-3, 6]:

$$f' = \frac{n \cdot r_1 \cdot r_2}{(n-1) \cdot [n \cdot (r_2 - r_1) + (n-1) \cdot d]}; \quad f = -\frac{n_1}{n'} \cdot f' \quad (4.1)$$

Знак фокусної відстані визначається правилом: фокусні відстані вважаються додатними по напрямку світла від головних площин.

Відношення показника заломлення середовища до відповідного фокусної відстані називається **оптичною силою системи** [1-3, 6]:

$$\Phi = \frac{n'}{f'} = \frac{(n-1)}{r_1} - \frac{(n-1)}{r_2} + \frac{(n-1)^2 \cdot d}{n \cdot r_1 \cdot r_2} \quad (4.2)$$

Передній і задній фокальний відрізки [1-3, 6]:

$$S_F = -f' \cdot \left(1 + \frac{n-1}{n} \cdot \frac{d}{r_2}\right); \quad S'_{F'} = f' \cdot \left(1 - \frac{n-1}{n} \cdot \frac{d}{r_1}\right) \quad (4.3)$$

Знак відрізку визначається правилом: відрізки вздовж оптичної осі вважаються позитивними, якщо їх напрямок співпадає з позитивним напрямком розповсюдження світла, і від'ємним – при зворотному напрямку.

*Позитивним напрямком вздовж оптичної осі вважається напрямок світла зліва направо.

Відстань від передньої головної площини до вершини передньої поверхні :

$$S_H = -f' \cdot d \cdot \frac{n-1}{n \cdot r_2}; \quad S'_{H'} = -f' \cdot d \cdot \frac{n-1}{n \cdot r_1} \quad (4.4)$$

Для перевірки отриманих параметрів використовують формули [1-3, 6]:

$$S_H = S_F - f; \quad S'_{H'} = S'_{F'} - f' \quad (4.5)$$

Знак відрізку визначається правилом: при заломленні або відбитті променів на сферичній поверхні за начало відліку відрізку приймається вершина поверхні (точка O). Відрізки вважають додатними, якщо вони відкладаються вздовж осі справа від точки O за напрямком розповсюдження світла, і від'ємним, коли відкладається зліва від точки O. У випадку від'ємних значень вказаних величин перед ними ставлять знак «Мінус».

Відстань між головними площинами визначається рівністю [1-3, 6]:

$$\Delta_{HH'} = d + S'_{H'} - S_H = d \cdot \left[1 - \left(\frac{f'}{n}\right) \cdot (n-1) \cdot \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}\right)\right] \quad (4.6)$$

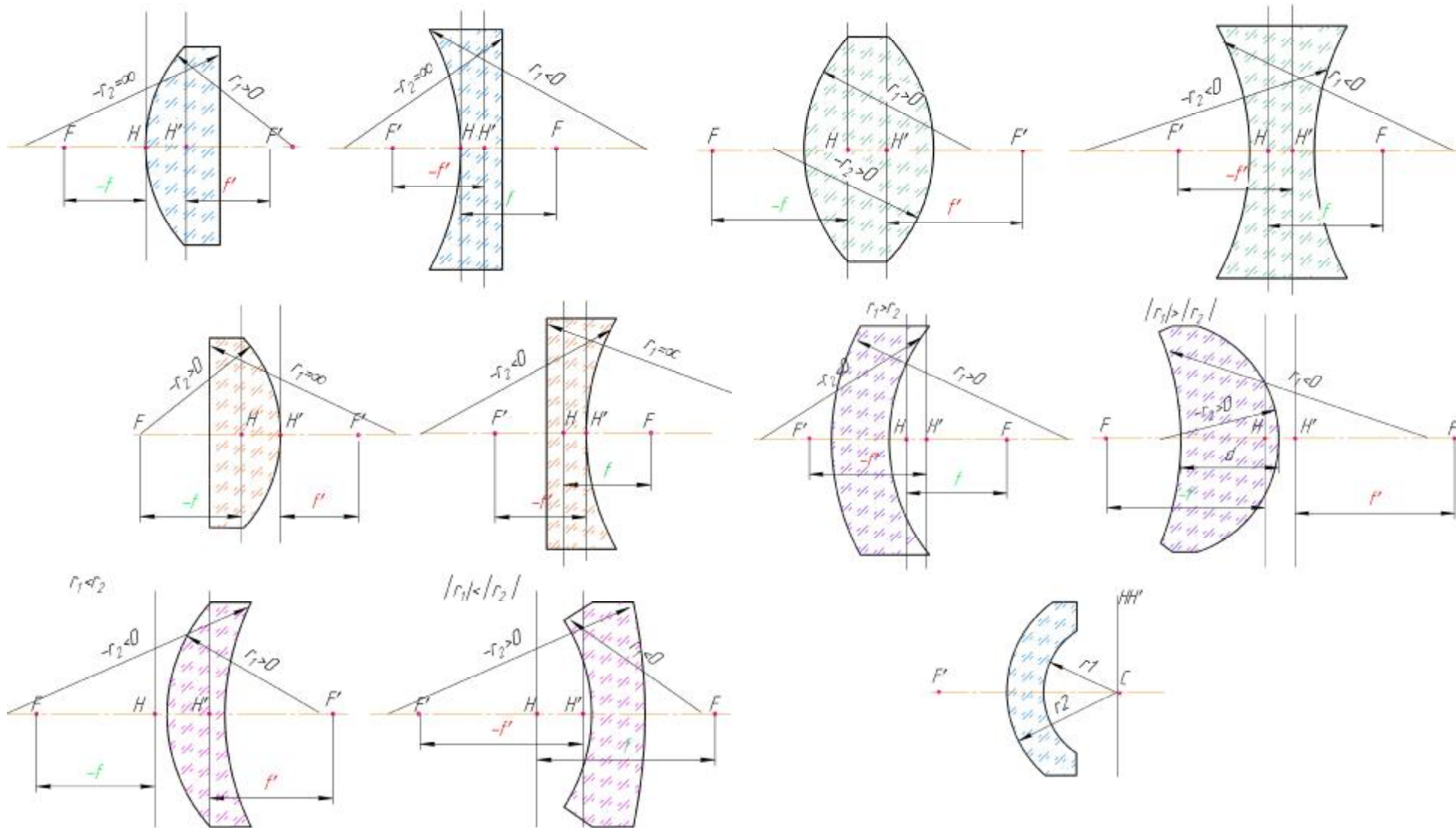
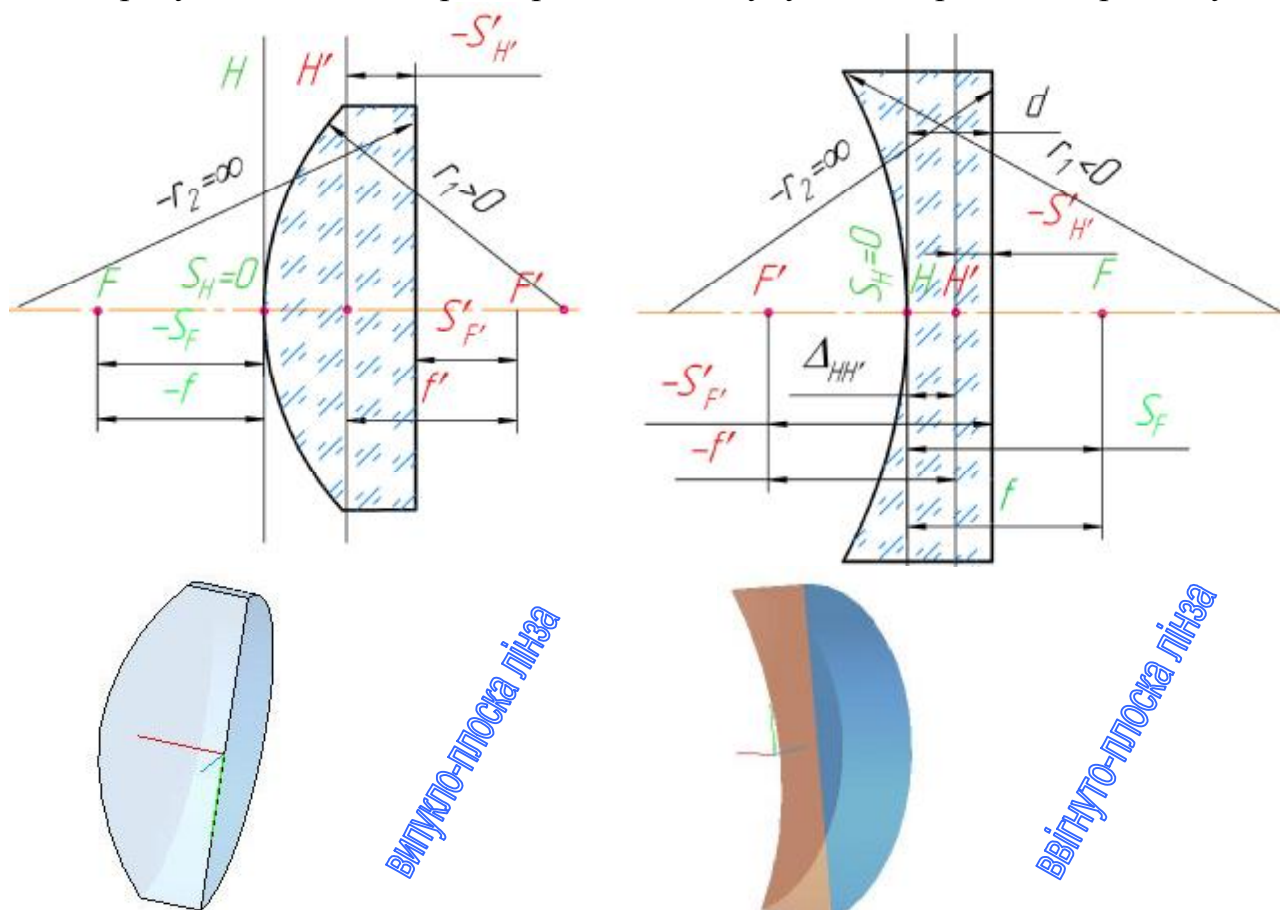
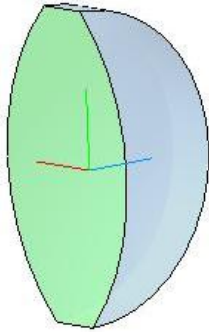
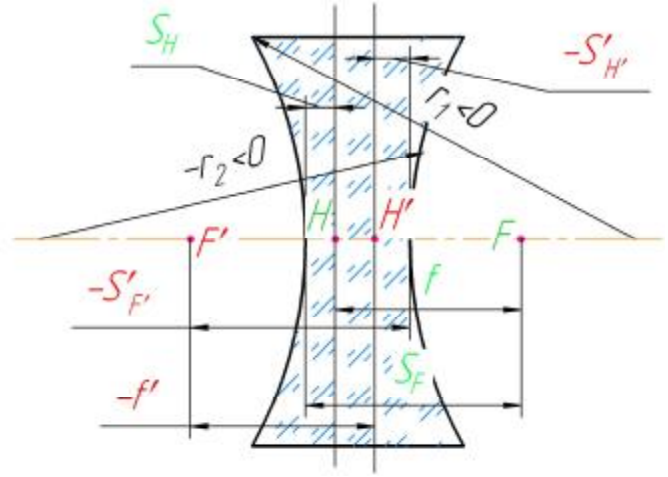
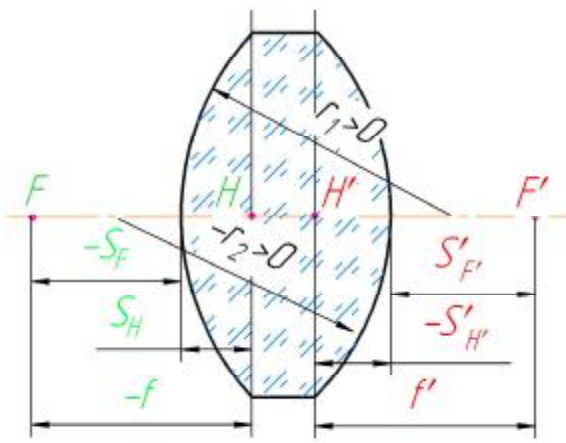


Рисунок 4.1 – Різновиди лінз [1-3, 6]

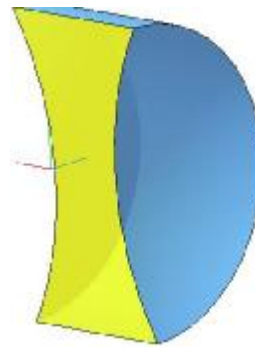
Приклад 4.1 Оптичні деталі приладів. Лінзи кінцевої товщини
 Розрахувати основні параметри лінзи. Побудувати зображення предмету.



Розрахункові формули	$r_1 = 10 \text{ мм}$	$r_1 = 10 \text{ мм}$
$f' = \frac{r_1}{(n-1)}$	16,949 мм	-16,949 мм
$f = -f'$	-16,949 мм	16,949 мм
S_H	0	0
$S_H = S_F - f$ - перевірка	$-16.94 - (-16.94) = 0$	$16.94 - 16.94 = 0$
$S'_{H'} = -\frac{d}{n}$	-1,258	-1,258 мм
$S'_{H'} = S'_{F'} - f'$ - перевірка	$15.691 - 16.949 =$ $= -1.258 \text{ мм}$	$-18.207 - (-16.949) =$ $= -1.258 \text{ мм}$
$S_{F'} = -f$	-16,94 мм	16,94 мм
$S'_{F'} = f' \cdot \left[1 - \frac{d}{r_1} \cdot \frac{n-1}{n} \right]$	15,691 мм	-18,207 мм
$\Delta_{HH'} = d + S'_{H'} - S_H =$ $= (n-1) \cdot \frac{d}{n}$	0,742 мм	0,742 мм

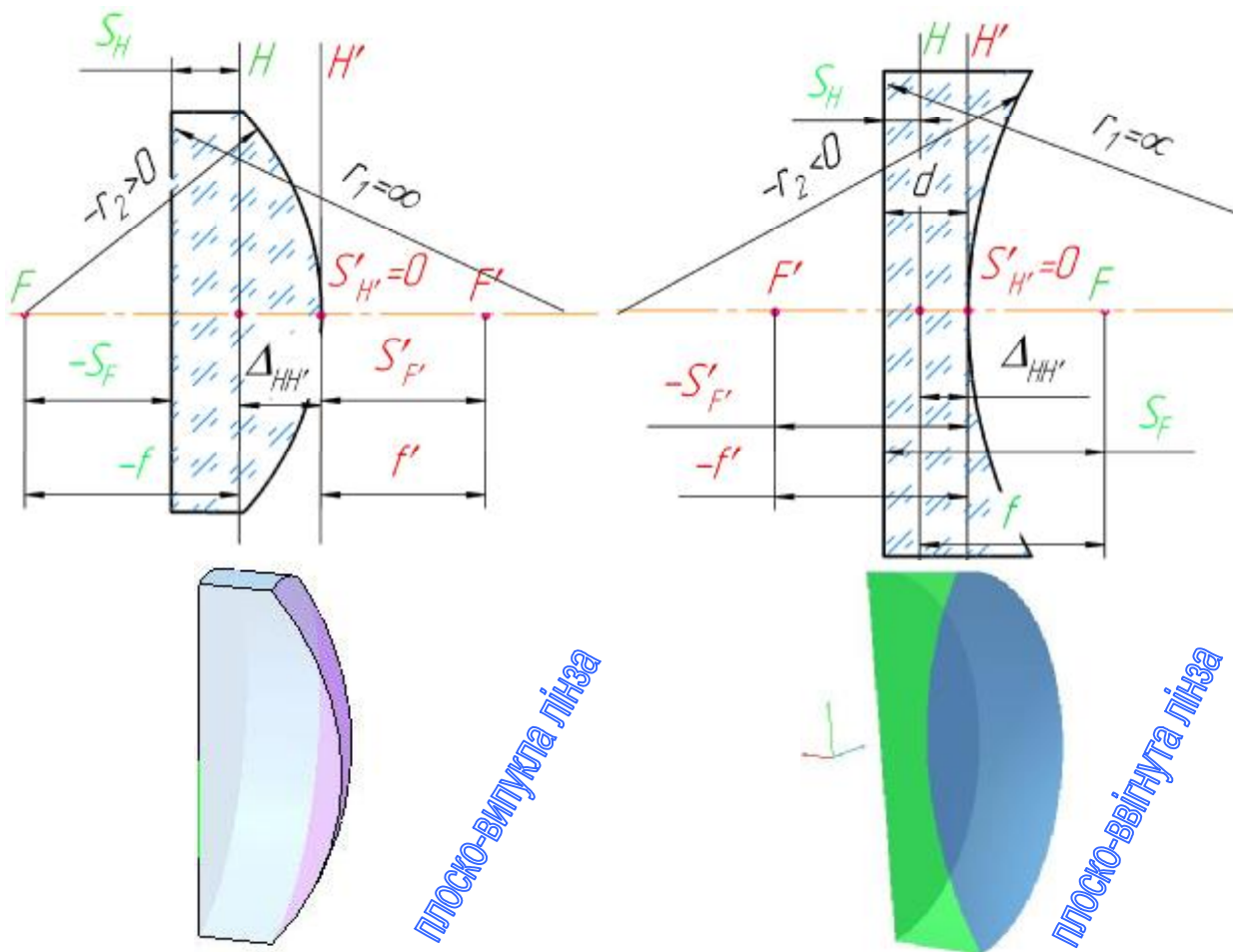


ПОДВІЙНО-ВИПУКА ЛІНЗА

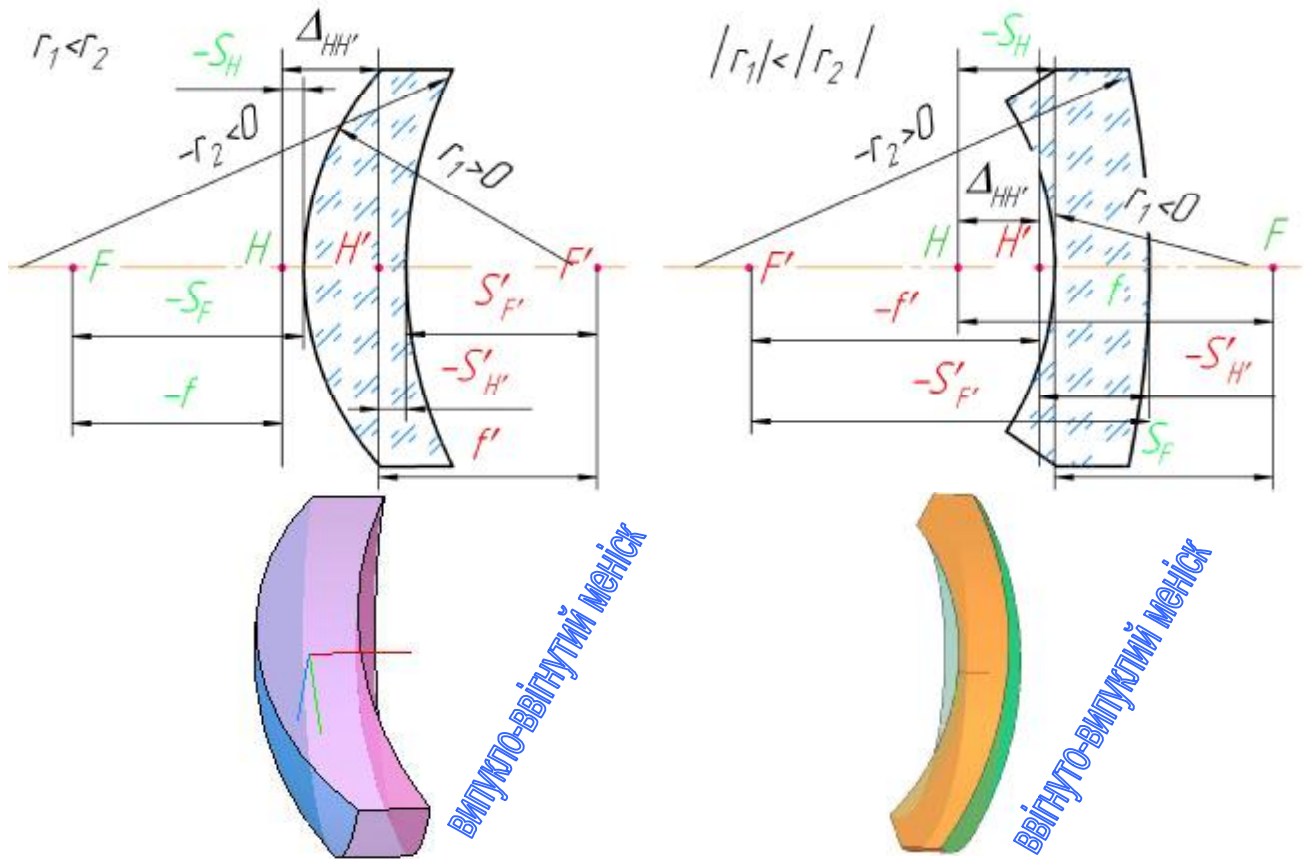


ПОДВІЙНО-ВВИГНУТА ЛІНЗА

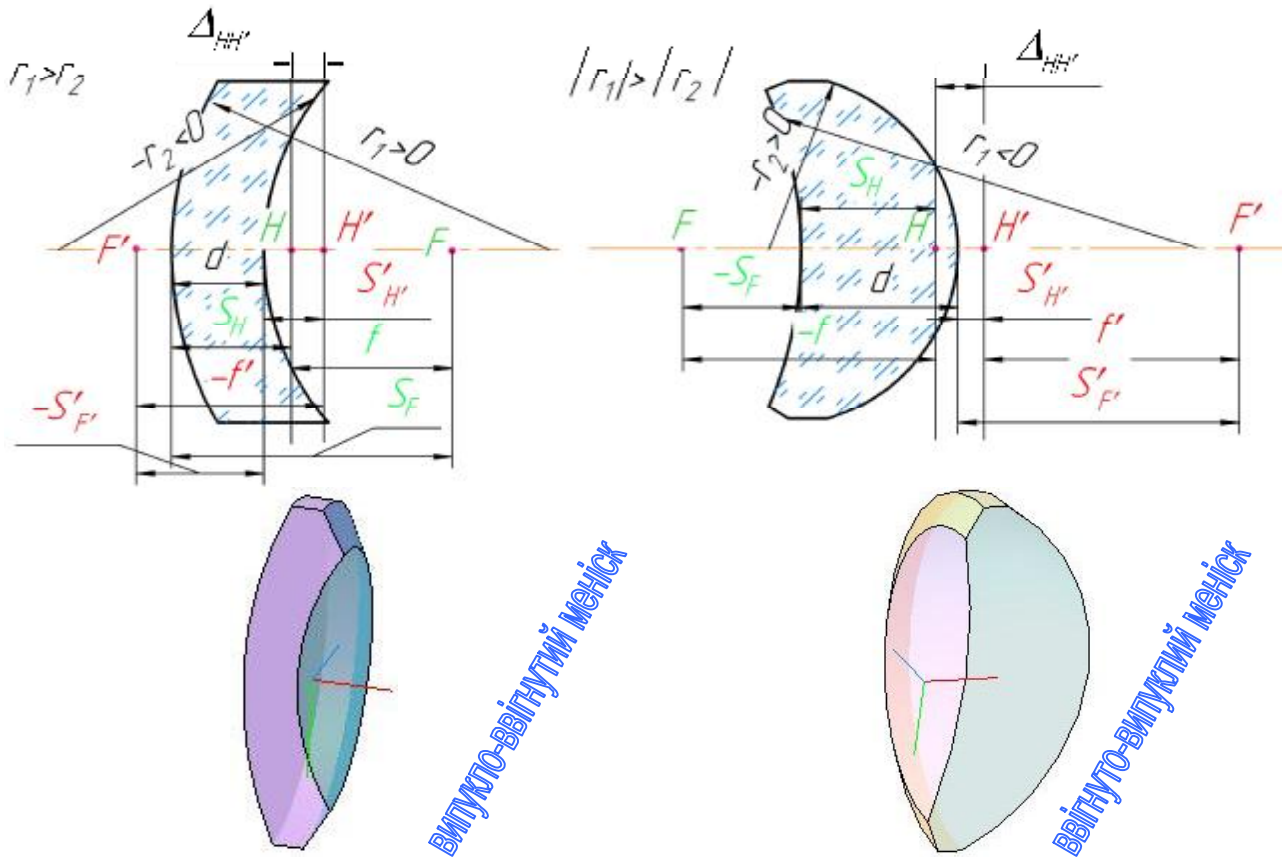
Розрахункові формули	$r_1=10 \text{ мм}; r_2=-10 \text{ мм}$	$r_1=-10 \text{ мм}; r_2=10 \text{ мм}$
$f' = n \cdot \frac{r_1 \cdot r_2}{(n-1) \cdot [n \cdot (r_2 - r_1) + (n-1) \cdot d]}$	8,8 мм	-8,171 мм
$f = -f'$	-8,8 мм	8,171 мм
$S_H = -f' \cdot d \cdot \frac{n-1}{n \cdot r_2}$	0,653 мм	0,606 мм
$S_H = S_F - f$ - перевірка	$-8,148 - (-8,8) =$ $= 0,652 \text{ мм}$	$8,778 - 8,171 =$ $= 0,607 \text{ мм}$
$S'_{H'} = -f' \cdot d \cdot \frac{n-1}{n \cdot r_1}$	-0,653 мм	-0,606 мм
$S'_{H'} = S'_{F'} - f'$ - перевірка	$8,148 - 8,8 =$ $= -0,652 \text{ мм}$	$-8,778 - (-8,171) =$ $= -0,607 \text{ мм}$
$S_F = -f' \cdot \left[1 + \frac{d}{r_2} \cdot \frac{n-1}{n} \right]$	-8,148 мм	8,778 мм
$S_{F'} = f' \cdot \left[1 - \frac{d}{r_1} \cdot \frac{n-1}{n} \right]$	8,148 мм	-8,778 мм
$\Delta_{HH'} = d + S'_{H'} - S_H$ $= d \cdot \left[1 - \left(\frac{f'}{n} \right) \cdot (n-1) \cdot \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) \right]$	0,694 мм	0,787 мм



Розрахункові формули	$r_2 = -10$ мм	$r_2 = 10$ мм
$f' = \frac{-r_2}{(n-1)}$	16,949 мм	-16,949 мм
$f = -f'$	-16,949 мм	16,949 мм
$S'_{H'}$	0	0
$S'_{H'} = S'_{F'} - f'$ - перевірка	$16.949 - 16.949 = 0$	$-16.94 - (-16.94) = 0$
$S_H = \frac{d}{n}$	1,258	1,258 мм
$S_H = S_F - f$ - перевірка	$-15.691 - (-16.949) = 1.258$ мм	$18.207 - 16.949 = 1.258$ мм
$S_F = -f' \cdot \left[1 + \frac{d}{r_2} \cdot \frac{n-1}{n} \right]$	-15,691 мм	18,207 мм
$S'_{F'} = f'$	16,949 мм	-16,949 мм
$\Delta_{HH'} = d + S'_{H'} - S_H = (n-1) \cdot \frac{d}{n}$	0,742 мм	0,742 мм



Розрахункові формули	$r_1 = 10 \text{ мм}; r_2 = 20 \text{ мм}$	$r_1 = -10 \text{ мм}; r_2 = -20 \text{ мм}$
$f' = n \cdot \frac{r_1 \cdot r_2}{(n-1) \cdot [n \cdot (r_2 - r_1) + (n-1) \cdot d]}$	31,556 мм	-36,616 мм
$f = -f'$	-31,556 мм	36,616
$S_H = -f' \cdot d \cdot \frac{n-1}{n \cdot r_2}$	-1,171 мм	-1,359
$S_H = S_F - f$ - перевірка	$-32.727 - (-31.556) =$ $= -1.171 \text{ мм}$	$35.257 - 36.616 =$ $= -1.359 \text{ мм}$
$S'_{H'} = -f' \cdot d \cdot \frac{n-1}{n \cdot r_1}$	-2,342 мм	-2,717
$S'_{H'} = S'_{F'} - f'$ - перевірка	$29.214 - 31.556 =$ $= -2.342 \text{ мм}$	$-39.333 - (-36.616) =$ $= -2.717 \text{ мм}$
$S_F = -f' \cdot \left[1 + \frac{d}{r_2} \cdot \frac{n-1}{n} \right]$	-32,727 мм	35,257
$S_{F'} = f' \cdot \left[1 - \frac{d}{r_1} \cdot \frac{n-1}{n} \right]$	+29,214 мм	-39,333
$\Delta_{HH'} = d + S'_{H'} - S_H$ $= d \cdot \left[1 - \left(\frac{f'}{n} \right) \cdot (n-1) \cdot \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) \right]$	0,829 мм	0,641 мм



Розрахункові формули	$r_1 = 20 \text{ мм}; r_2 = 10 \text{ мм}$	$r_1 = -20 \text{ мм}; r_2 = -10 \text{ мм}$
$f' = n \cdot \frac{r_1 \cdot r_2}{(n-1) \cdot [n \cdot (r_2 - r_1) + (n-1) \cdot d]}$	-36.616 мм	31.556 мм
$f = -f'$	36.616 мм	-31.556 мм
$S_H = -f' \cdot d \cdot \frac{n-1}{n \cdot r_2}$	2.717 мм	2.342 мм
$S_H = S_F - f$ - перевірка	$39.333 - 36.616 =$ $= 2.717 \text{ мм}$	$-29.214 - (-31.556) =$ $= 2.342 \text{ мм}$
$S'_{H'} = -f' \cdot d \cdot \frac{n-1}{n \cdot r_1}$	1.359 мм	1.171 мм
$S'_{H'} = S'_{F'} - f'$ - перевірка	$-35.257 - (-36.616) =$ $= 1.359 \text{ мм}$	$32.727 - 31.556 =$ $= 1.171 \text{ мм}$
$S_F = -f' \cdot \left[1 + \frac{d}{r_2} \cdot \frac{n-1}{n} \right]$	39.333 мм	-29.214 мм
$S_{F'} = f' \cdot \left[1 - \frac{d}{r_1} \cdot \frac{n-1}{n} \right]$	-35.257 мм	32.727 мм
$\Delta_{HH'} = d + S'_{H'} - S_H$ $= d \cdot \left[1 - \left(\frac{f'}{n} \right) \cdot (n-1) \cdot \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) \right]$	0.641 мм	0.829 мм

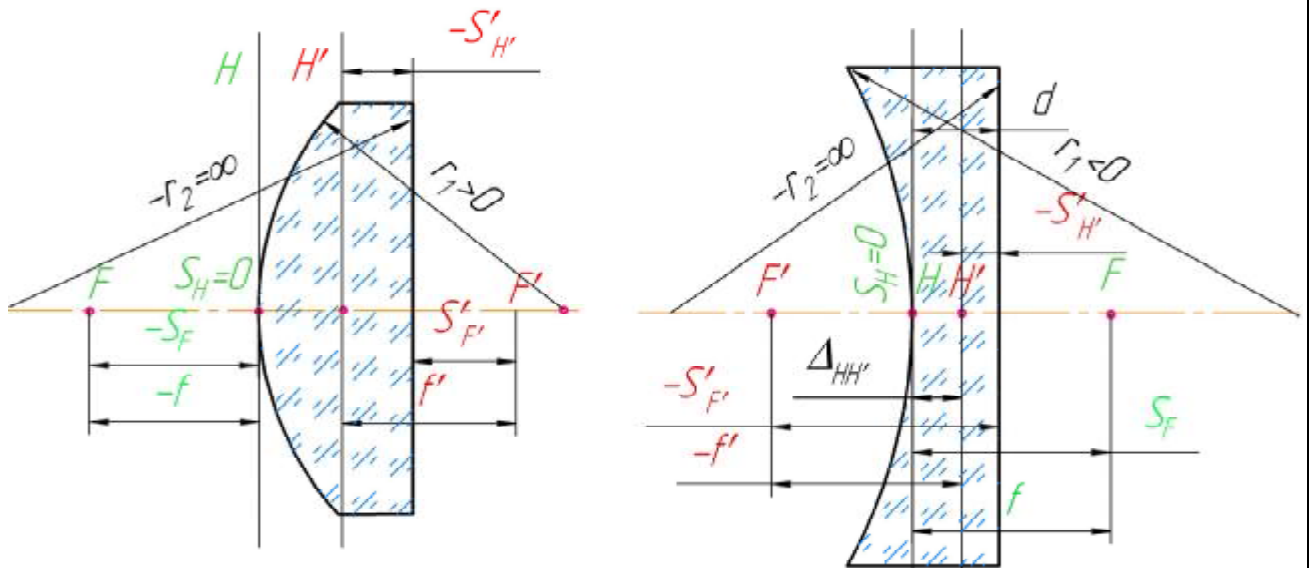
3. Виконання роботи

Завдання 1

Розрахувати основні параметри випукло-пласкої та ввігнуто-пласкої лінзи.

Побудувати зображення предмету, що розташований на заданій відстані.

Вихідні дані										
варіант	1		2		3		4		5	
r_1 , мм	52	-52	54	-54	56	-56	58	-58	60	-60
Розташування предмету – $a = k \cdot f$, мм – $a = k \cdot f'$, мм	$k = 2.15$		2.1		2.15		2.05		2.25	
y , мм	12		14		16		18		21	
n	1.7512		1.6814		1.7435		1.5175		1,8114	



*Примітка. На рисунку необхідно проставити всі розміри згідно розрахунку

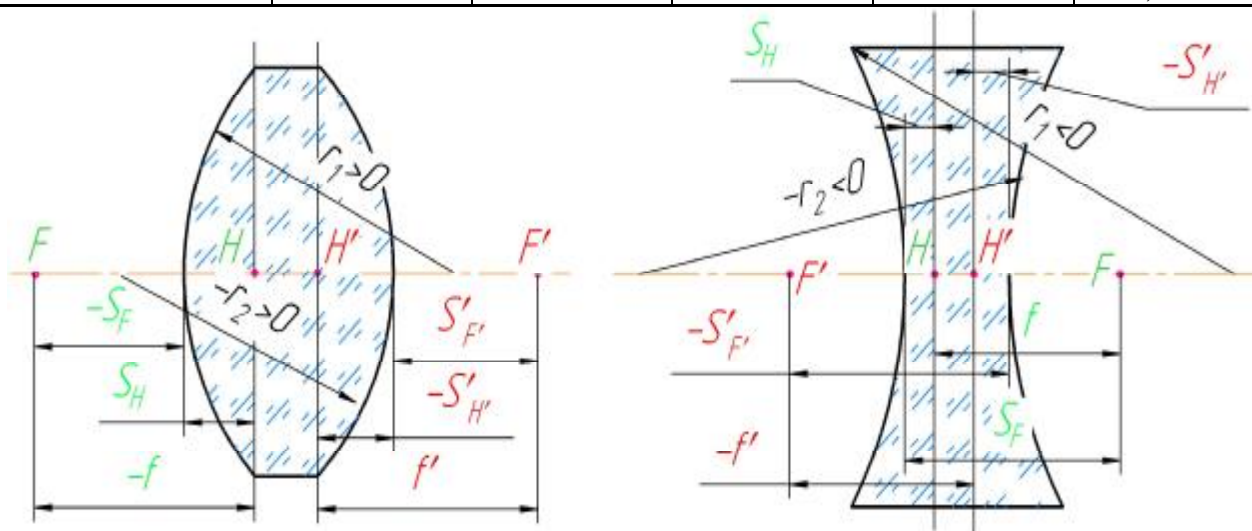
Результати розрахунку варіант №

$f' = \frac{r_1}{(n-1)}$		
$f = -f'$		
$S_H = 0$		
$S_H = S_F - f$		
$S'_{H'} = -\frac{d}{n}$		
$S'_{H'} = S'_{F'} - f'$		
$S_F = -f$		
$S'_{F'} = f' \cdot \left[1 - \frac{d}{r_1} \cdot \frac{n-1}{n} \right]$		
$\Delta_{HH'} = d + S'_{H'} - S_H = (n-1) \cdot \frac{d}{n}$		

Завдання 2

Розрахувати основні параметри подвійно-випуклої та подвійно-ввігнутої лінзи. Побудувати зображення предмету, що розташований на заданій відстані.

варіант	1		2		3		4		5	
$r_1, \text{мм}$	42	-42	44	-44	46	-46	48	-48	50	-50
$r_2, \text{мм}$	-42	42	-44	44	-46	46	-48	48	-50	50
Розташування предмету	$-a = 2 \cdot f, \text{мм}; -a = 2 \cdot f', \text{мм}$									
$y, \text{мм}$	12		14		16		18		21	
n	1.7512		1.6814		1.7435		1.5175		1,8114	



*Примітка. На рисунку необхідно проставити всі розміри згідно розрахунку

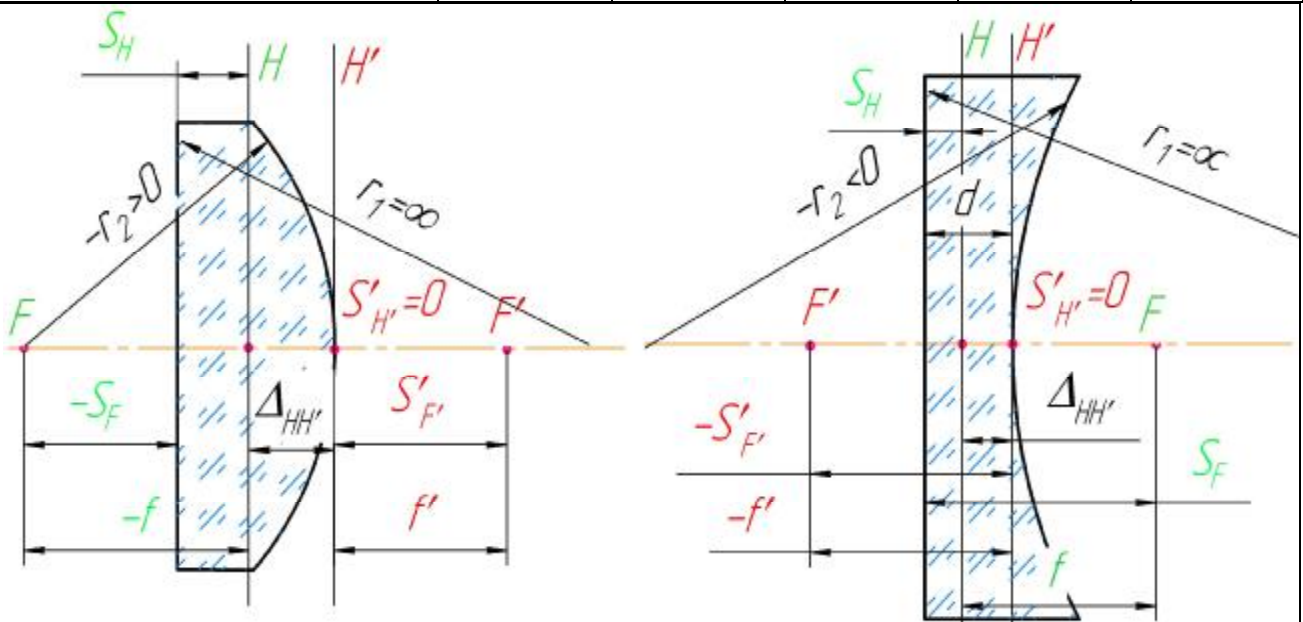
Результати розрахунку варіант №

$f' = n \cdot \frac{r_1 \cdot r_2}{(n-1) \cdot [n \cdot (r_2 - r_1) + (n-1) \cdot d]}$		
$f = -f'$		
$S_H = -f' \cdot d \cdot \frac{n-1}{n \cdot r_2}$		
$S_H = S_F - f$		
$S_{H'} = -f' \cdot d \cdot \frac{n-1}{n \cdot r_1}$		
$S_{H'} = S_{F'} - f'$		
$S_F = -f' \cdot \left[1 + \frac{d}{r_2} \cdot \frac{n-1}{n} \right]$		
$S_{F'} = f' \cdot \left[1 - \frac{d}{r_1} \cdot \frac{n-1}{n} \right]$		
$\Delta_{HH'} = d + S_{H'} - S_H$		
$= d \cdot \left[1 - \left(\frac{f'}{n} \right) \cdot (n-1) \cdot \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) \right]$		

Завдання 3

Розрахувати основні параметри плоско-випуклої та плоско-ввігнутої лінзи. Побудувати зображення предмету, що розташований на заданій відстані.

варіант	1		2		3		4		5	
$r_2, \text{мм}$	-10	10	-12	12	-14	14	-16	16	-18	18
Розташування предмету – $a = k \cdot f, \text{мм}$	$k = 1.25$		1.35		1.45		1.35		1.55	
$y, \text{мм}$	7		9		11		13		15	
n	1.5795		1.5826		1.6222		1.6259		1.6334	



*Примітка. На рисунку необхідно проставити всі розміри згідно розрахунку

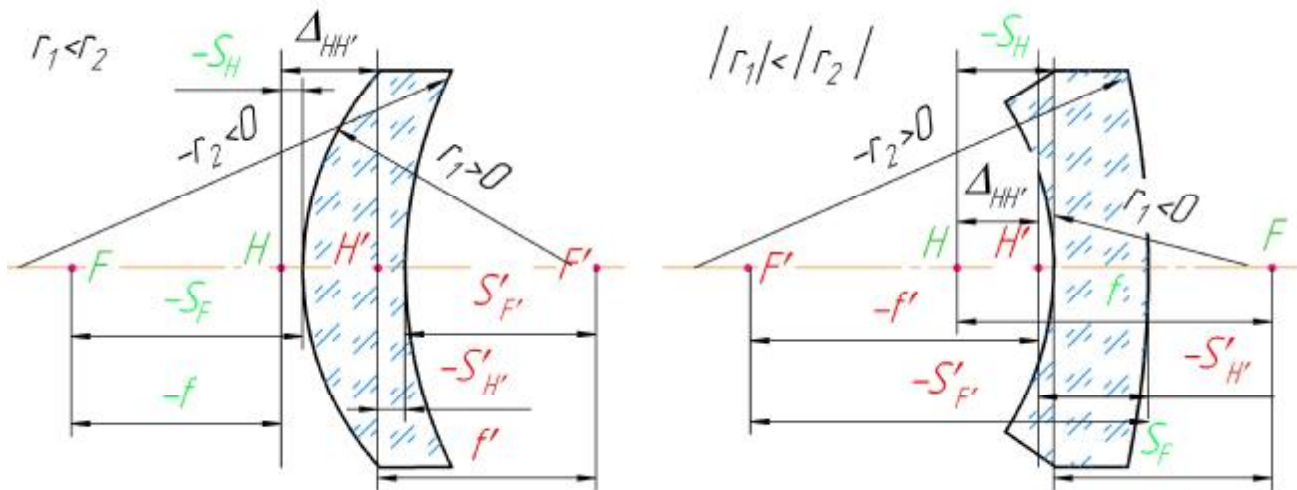
Результати розрахунку варіант №

$f' = \frac{-r_2}{(n-1)}$		
$f = -f'$		
$S'_{H'}$		
$S'_{H'} = S'_{F'} - f'$		
$S_H = \frac{d}{n}$		
$S_H = S_F - f$		
$S_F = -f' \cdot \left[1 + \frac{d}{r_2} \cdot \frac{n-1}{n} \right]$		
$S'_{F'} = f'$		
$\Delta_{HH'} = d + S'_{H'} - S_H = (n-1) \cdot \frac{d}{n}$		

Завдання 4.

Розрахувати основні параметри випукло – ввігнутого та ввігнуто-випуклого меніска. Побудувати зображення предмету, що розташований на заданій відстані – $a = k \cdot f$, мм

Вихідні дані										
варіант	1		2		3		4		5	
r_1 , мм	10	-10	11	-11	12	-12	13	-13	14	-14
r_2 , мм	20	-20	21	-21	22	-22	23	-23	24	-24
Розташування предмету	$k = 0.55$		0.65		0.65		0.55		0.45	
y , мм	7		9		11		13		15	
n	1.6395		1.6709		1.6140		1.7424		1.7521	



*Примітка. На рисунку необхідно проставити всі розміри згідно розрахунку

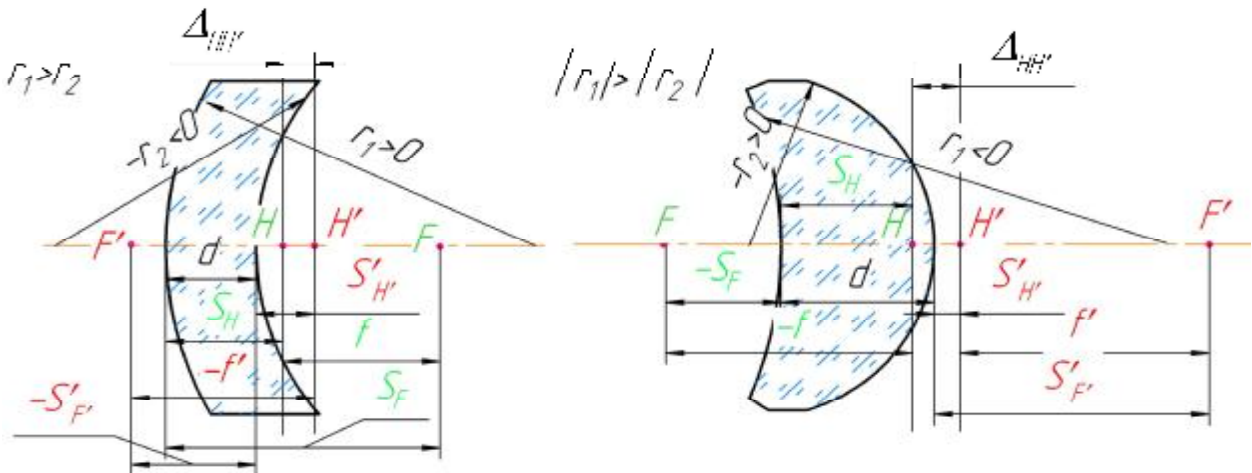
Результати розрахунку варіант №

$f' = n \cdot \frac{r_1 \cdot r_2}{(n-1) \cdot [n \cdot (r_2 - r_1) + (n-1) \cdot d]}$		
$f = -f'$		
$S_H = -f' \cdot d \cdot \frac{n-1}{n \cdot r_2}$		
$S_H = S_F - f$		
$S'_{H'} = -f' \cdot d \cdot \frac{n-1}{n \cdot r_1}$		
$S'_{H'} = S'_{F'} - f'$		
$S_F = -f' \cdot \left[1 + \frac{d}{r_2} \cdot \frac{n-1}{n} \right]$		
$S_{F'} = f' \cdot \left[1 - \frac{d}{r_1} \cdot \frac{n-1}{n} \right]$		
$\Delta_{HH'} = d + S'_{H'} - S_H$		
$= d \cdot \left[1 - \left(\frac{f'}{n} \right) \cdot (n-1) \cdot \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) \right]$		

Завдання 5.

Розрахувати основні параметри випукло – ввігнутого та ввігнуто-випуклого меніска. Побудувати зображення предмету, що розташований на заданій відстані $a = k \cdot f$, мм

Вихідні дані										
варіант	1		2		3		4		5	
r_2 , мм	10	-10	11	-11	12	-12	13	-13	14	-14
r_1 , мм	20	-20	21	-21	22	-22	23	-23	24	-24
Розташування предмету	$k = 0.55$		0.65		0.65		0.55		0.45	
y , мм	7		9		11		13		15	
n	1.6395		1.6709		1.6140		1.7424		1.7521	



*Примітка. На рисунку необхідно проставити всі розміри згідно розрахунку

Результати розрахунку варіант №

$f' = n \cdot \frac{r_1 \cdot r_2}{(n-1) \cdot [n \cdot (r_2 - r_1) + (n-1) \cdot d]}$		
$f = -f'$		
$S_H = -f' \cdot d \cdot \frac{n-1}{n \cdot r_2}$		
$S_H = S_F - f$		
$S_{H'} = -f' \cdot d \cdot \frac{n-1}{n \cdot r_1}$		
$S_{H'} = S_{F'} - f'$		
$S_F = -f' \cdot \left[1 + \frac{d}{r_2} \cdot \frac{n-1}{n} \right]$		
$S_{F'} = f' \cdot \left[1 - \frac{d}{r_1} \cdot \frac{n-1}{n} \right]$		
$\Delta_{HH'} = d + S_{H'} - S_H$		
$= d \cdot \left[1 - \left(\frac{f'}{n} \right) \cdot (n-1) \cdot \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) \right]$		

Контрольні питання для перевірки кінцевого рівня знань

1. Класифікація лінз.
2. Основні параметри оптичної системи з плоско-ввігнутою лінзою.
3. Основні параметри оптичної системи з плоско-випуклою лінзою.
4. Основні параметри оптичної системи з подвійно-ввігнутою лінзою.
5. Основні параметри оптичної системи додатним меніском.
6. Основні параметри оптичної системи від'ємним меніском.
7. Оптична сила системи.

Література

1. Гвоздева И.П., Коркина К.И. Прикладная оптика и оптические измерения. – М.: Машиностроение, 1976.
2. Справочник конструктора оптико-механических приборов / В.А. Панов, М.Я. Кругер, В.В. Кулагин и др.; Под общ. ред.. В.А. Панова. – Л.: Машиностроение, Ленингр. отд., 1980. – 742 с., ил.
3. Прикладная оптика: Учебн. пособие для приборостроительных специальностей вузов / Л.Г. Бебчук, Ю.В. Богачев, Н.П. Заказнов и др.; Под общ. ред. Н.П. Заказнова. – М.: Машиностроение, 1988. -312 с.
4. Ландсберг Г.С. Оптика. Учебн. пособие: для вузов – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. – 848 с.
5. Стафеев С.К., Боярский К.К., Башина Г.А. Основы оптики: Учебное пособие. – СПб.: Питер, 2006. – 336 с.
6. Заказнов Н.П. Теория оптических систем: Учебник для студентов приборостроительных специальностей вузов / Н.П. Заказнов, С.И. Кирюшин, В.Н. Кузичев. – М.: Машиностроение, 1992. – 448 с.