DOI
УДК 502.174.3

Є.С. Чернозьомов, аспірант
Інститут проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова НАН України
Україна, 03164, Київ, вул. Генерала Наумова, 15
тел. 093 8575836; e-mail: werytist@gmail.com

Моделі аберацій гіперболічних відбивачів другого і вищого порядку кривизни в системах передачі променевої енергії

Розглянуто процеси передачі променевої енергії при використанні гіперболічних поверхонь і супроводжуючі їх ефекти. Запропоновано нову концепцію оптичної системи сонячного енергетичного концентратора і її різновиди. Розглянуто аберацію, що виникає в таких системах і можливість передачі променевої енергії за допомогою системи гіперболоїда, яка складається з поверхонь другого і вищого порядків. Розглянуто можливість створення ефекту самофокусування в дзеркальних оптичних системах.

К л ю ч о в і с л о в а: лазер, ефект самофокусування, колімація, гіперболоїд, астероїд, ескавація, експлозія, імплозія, магнітар, апланати.

Сонячний енергетичний концентратор-коліматор створює однонапрямлений світловий потік підвищеної енергетичної щільності, для передачі його на відстані за допомогою хвилеводу, зі збереженням енергетичної складової випромінювання. Для цього потрібна достатньо якісна колімація [1]. Але таке завдання пов’язане з проблемами, подібними до проблем створення променевої зброї, описаної у фантастичних романах Жюль Верна та Уельса або О.М. Толстого.

У 1944 р. проф. Г.Г. Слюсарєв у роботі [2] висловився про практичну неможливість створення гіперболоїда інженера Гаріна, описаного в однойменному романі О.М. Толстого. Основним аргументом Г.Г. Слюсарєва став той факт, що будь-яка оптична система має так званий відносний отвір, що є співвідношенням діаметру вхідної зіниці до фокусної відстані від останнього оптичного елемента. Якщо в сонячний день направити лінзу до сонця, можна сконцентрувати промені в точку і з легкістю підпалити аркуш паперу, але тільки на відносно невеликій відстані

(відносно діаметру лінзи). Якщо взяти довгофокусну лінзу з фокусною відстанню всього у декілька разів більше її діаметру, то вже не вдасться зібрати промені до такого розміру, щоб що-небудь підпалити. Наразі сьогодні існують технологічні лазери, здатні різати метал як ніж масло, але їх оптика дозволяє робити це тільки на відстані в декілька міліметрів.

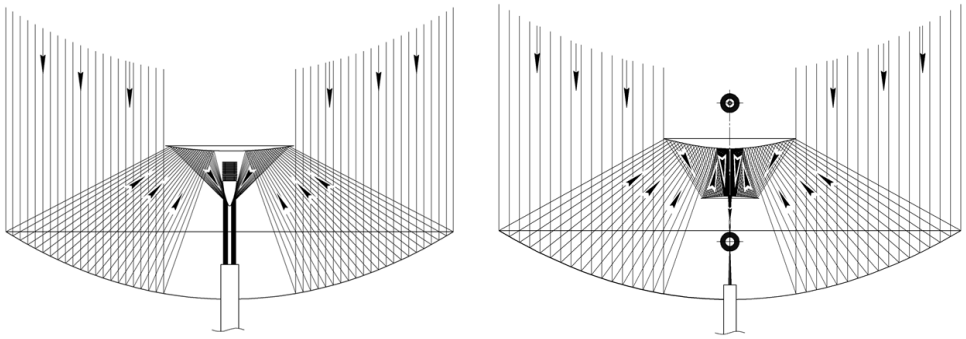
Відомо, що бойові лазери можуть знищувати об'єкти на великих відстанях. Такі лазери наразі дійсно існують, імовірно вони реалізовані на основі волоконного лазера, для якого поняття «відносний отвір» непридатне. Це тому, що у волоконних лазерах використовується ефект самофокусування, який лежить за рамками концептуальних принципів і можливостей класичної оптики. Резонатор волоконного лазера складається з пучка волокон, кожне з яких за будовою нагадує звичайний оптоволоконний кабель для передачі інформації, тільки в лазерному волокні межа розділу середовищ починається поступово, тобто коефіцієнт заломлення від центру до стінок волокон змінюється градієнтно, створюється анізотропія до напряму поширення світла.

Таке середовище називається нелінійним. Індуковане випромінювання, яке генерується в активному середовищі, може бути спрямоване у будь-яку сторону. Чим більше воно спрямовано до стінки волокна, тим сильніше воно буде відхилятися у бік осі хвилеводу. В результаті усе випромінювання вирівнюється строго паралельно осі волокна, що є ефектом самофокусування в нелінійних середовищах.

Варто нагадати, що в резонаторі звичайного лазера (наприклад, CO_2-лазера) випромінювання індуковане не в напрямку виходу променя фільтрується, пропускається тільки випадково спрямоване у бік поширення променя тому в таких лазерах високі енерговтрати. У волоконних лазерах, завдяки ефекту самофокусування, використовується уся енергія індукованого випромінювання, що дозволяє створювати надпотужні лазери з досить якісно колімованим світловим потоком, внаслідок чого променева енергія передається на великі відстані.

Як відомо, те, що може бути досягнуто за допомогою оптики заломлення, можна реалізувати на основі дзеркальної оптики, і з покращеними спектральними та енергетичними характеристиками. До речі, Архімед спалив ворожий флот саме за допомогою дзеркал.

У геометричній оптиці аберацією називається відхилення променя від заданої траєкторії поширення в оптичній системі. До теперішнього часу не вдалося створити оптичну систему, повністю позбавлену аберацій, і з цим доводиться миритися за допомогою тих чи інших способів. Наприклад, в оптичних системах, в яких використовуються лінзи, через різницю заломлення різних довжин хвиль спостерігається ахроматична аберація. Щоб зменшити вплив цієї аберації, оптика заломлення



а *б*

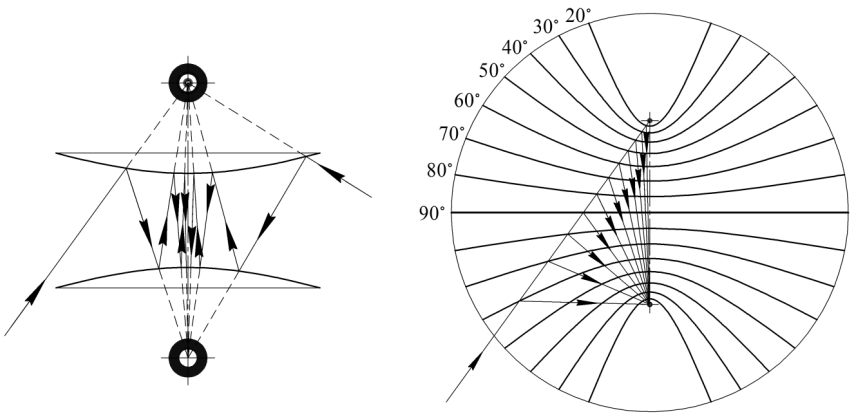
Рис. 1. Оптичні системи сонячних енергетичних концентраторів: *а* — на основі апертурного стрижня [3]; *б* — на основі гіперболоїда [4]

має дуже вузький діапазон пропускання, для чого, наприклад, на об'єктивах фото-відеокамер встановлюються фільтри довгохвильового оптичного спектру.

Дзеркальні оптичні системи не мають ахроматичної аберації, оскільки кут падіння дорівнює куту віддзеркалення незалежно від довжини хвилі. Завдяки цьому такі системи можуть мати досить широку смугу пропускання, від рентгенівського до радіодіапазону, зокрема усього діапазону спектру сонячного випромінювання. Дзеркальні системи використовуються в астрономічних телескопах, що дозволяє збільшити їх світлосилу і поле зору в порівнянні з лінзовими системами. Проте дзеркальні оптичні системи також не позбавлені впливу аберації, що зумовлює велику різноманітність оптичних систем телескопів.

Будемо вирішувати завдання не перемогти аберації, а використовувати їх для отримання ефекту самофокусування, що недосяжно методами, прийнятими в оптиці. Тут потрібний принципово новий підхід. Оскільки сонячний енергетичний концентратор це не астрономічний телескоп, потрібна спеціальна променево-енергетична оптична система.

На рис. 1 показано відомі оптичні системи енергетичних концентраторів, які відрізняються способом формування колімованого світлового потоку. Головною їх особливістю є різний концептуальний підхід. Концентратор на основі апертурного стрижня (рис. 1, *а*) виконано за канонами геометричної оптики, тобто від кожного оптичного елемента, випромінювання відбивається один раз. Від дзеркал гіперболоїда (рис. 1, *б*) випромінювання відбивається багаторазово, поступово орієнтуючись паралельно оптичній осі. Остання система не підходить для формування зображення, але відмінно пропускає енергетичну складову випромінювання [1]. Отже, ця концепція найбільш перспективна для застосування її в сонячних енергетичних концентраторах.



а *б*

Рис. 2. Принцип роботи системи дзеркал гіперболоїда: *а* — поширення випромінювання в системі гіперболоїда; *б* — сімейство гіпербол з різними кутами асимптот але однаковою фокусною відстанню

Енергетичний концентратор (рис. 1, *б*) складається з дзеркала прийому параболічної форми і системи двопорожнинного гіперболоїда. При цьому фокус параболи поєднаний з одним з фокусів гіперболоїда. Двопорожнинний гіперболоїд складається з двох гіпербол, які є асферичними поверхнями і описані кривою обертання другого порядку. Така гіпербола має два фокуси, які в системі гіперболоїда розміщені так, що співпадають по обох фокусах. В результаті система гіперболоїда також має два фокуси.

Система дзеркал двопорожнинного гіперболоїда працює так. На (рис. 2, *а*) показано траєкторії поширення двох променів, що потрапили в систему гіперболоїда під різними кутами. Якщо в один з фокусів гіперболоїда потрапляє промінь, то він, відбившись від першої порожнини, потрапляє в другий фокус. Зустрівши на шляху другу порожнину, він відібивається в перший фокус. З кожною ітерацією кут віддзеркалення променя наближається до осі асферичних дзеркал. Таким чином, усі промені, що потрапили в систему гіперболоїда незалежно від початкового кута входу, орієнтуються в одному напрямі, що є ефектом колімації.

На (рис. 2, *б*) показано сімейство гіпербол з різним кутом асимптот (від 20 до 90 град), але з однаковою фокусною відстанню, поєднані за фокусами, тобто усі вони об’єднані в гіперболоїд. Видно, що промінь, потрапивши в один з фокусів, від будь-якої гіперболи відбивається в протилежний фокус. Це свідчить про те, що ефект колімації зберігається при використанні гіпербол з будь-яким кутом асимптот, хоч з позитивною

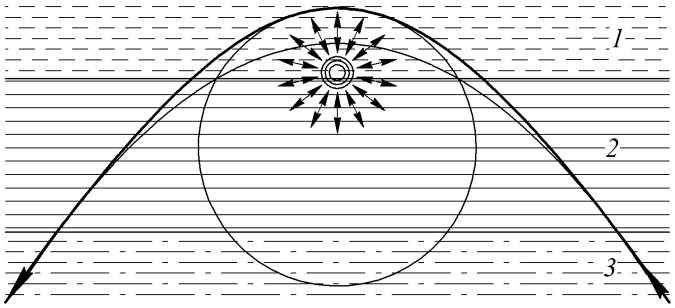


Рис. 3. Траєкторія руху космічного тіла в гравітаційному полі, описує гіперболу, і області гіперболи з різними характерами кривизни: *1* — область з кривизною близькою до сферичної; *2* — область з кривизною, близькою до параболічної; *3* — область з кривизною, близькою до конічної

хоч з негативною кривизною, звичайно, за умови, що вони належать одній системі гіперболоїда.

З оптики асферичних дзеркал відомо, що при віддзеркаленні від дзеркала з гіперболічним характером кривизни існує тенденція зменшення сферичної аберації. Цей ефект використовується в системі дзеркал Кассегрена [5].

Щоб зрозуміти, як працює гіпербола, розглянемо ефекти, що виникають в процесах, які супроводжуються гіперболічними утвореннями. Гіперболічну форму має траєкторія руху астероїда або іншого космічного тіла, що потрапило в гравітаційне поле планети (рис. 3). Центр планети в цьому випадку є геометричним фокусом гіперболи, що утворилася. Відомо, що щільність гравітаційного поля, як, власне, і світлового випромінювання, залежить від відстані від джерела, змінюється за законом зворотних квадратів (щільність поля обернено пропорційна до квадрата відстані від джерела випромінювання). При наближенні астероїда до джерела гравітації збільшується швидкість зміни кривизни його траєкторії і змінюється характер кривизни, в процесі чого утворюється гіпербола.

Таку гіперболу можна розділити на три області (на рис. 3 в гіперболу вписані сфера і парабола). В області підвищеної щільності *1* характер кривизни гіперболи близький до сферичної форми, в області середньої щільності *2* кривизна близька до параболічної форми, а в області низької щільності *3* вона близька до конічної форми. При цьому відстань прокладеної траєкторії проходження астероїда буде прямо пропорційна куту асимптоти (див. рис. 2, *б*).

Гіпербола також утворюється на стадії екскавації при експлозії (рис. 4, *а*, *в*), що може бути викликане потужним вибухом на поверхні або

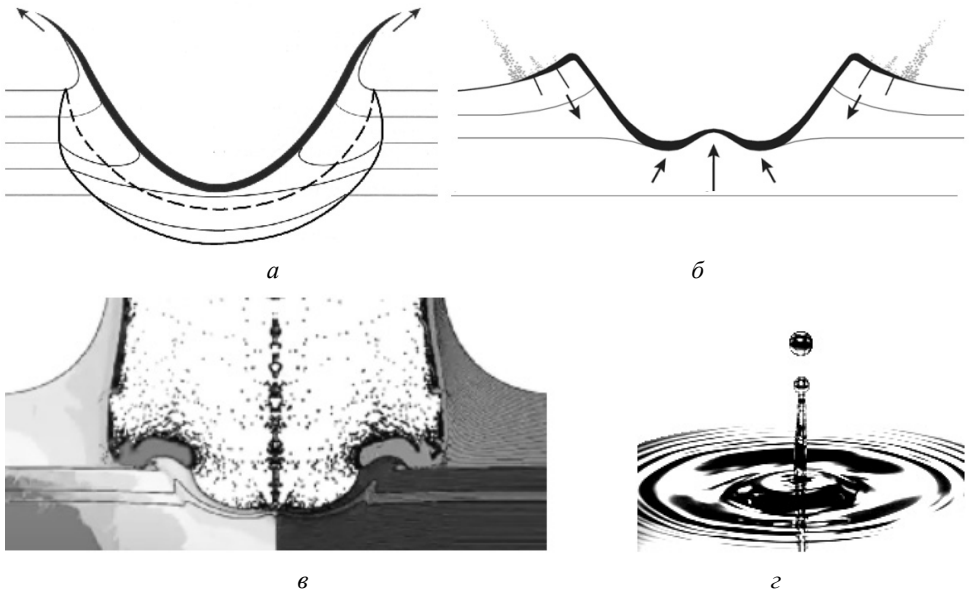
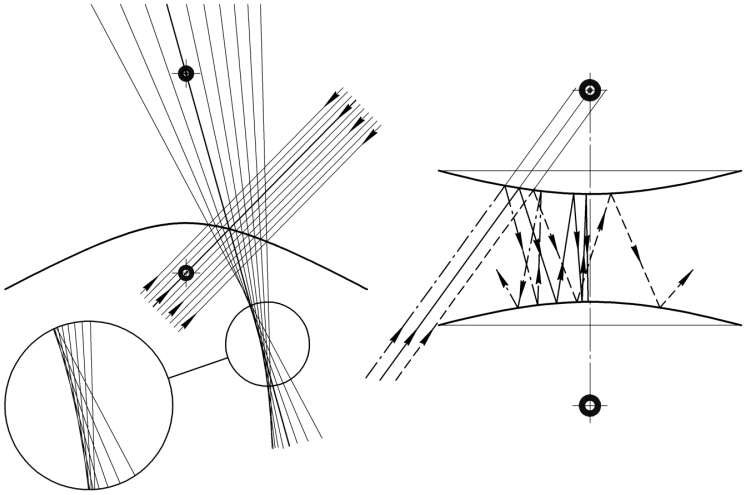


Рис. 4. Ефекти, що супроводжують входження астероїда в щільніше середовище (вода, грунт) [6]: *а* — стадія ескалації; *б* — стадія розвитку підйому центральної частини; *в* — утворення односпрямованого потоку в результаті моделювання вибуху потужністю 5000 мегатонн [7]; *г* — крапля, що впала у воду

входженням астероїда в щільніше середовище (вода, грунт). В цьому випадку треба замінити щільність гравітації на потужність енергії, що вивільняється з точки. Отже, в зоні найбільших енергій воронка матиме сферичний характер кривизни. При зменшенні сили експлозії вона переходитиме в параболічну, а потім і в конічну форму. Подібні процеси відбуваються в результаті падіння краплі у воду (рис. 4, *г*). Характерною особливістю подібних процесів є утворення односпрямованого потоку (рис. 4, *б*, *в*, *г*), який за напрямом співпадає з геометричною віссю гіперболи. Це свідчить про правильний напрям міркувань.

У записці від 14 січня 1954 року Я.Б. Зельдовича і А.Д. Сахарова Ю.Б Харитону «Про використання виробу для цілей обтискання надвиробу РДС-6С» наведено попередню схему пристрою, що складається з трьох частин: виробу (експлозивного атомного заряду), діафрагми і надвиробу (імплозивного термоядерного заряду) [8]. Вочевидь, діафрагма має таке ж важливе значення як експлозивний і імплозивний заряди. За всіма ознаками, діафрагму виконано у формі гіперболи, в обох фокусах якої розміщено заряди, що дозволило б перетворити сферичний фронт вибуху ініціюючого заряду в той, що згортається в точку у фокусі на протилежній стороні гіперболи, для створення симетричного обтискання аж до внутрішньозоряної щільності.



а *б*

Рис. 5. Аберації в системі дзеркал гіперболоїда у вигляді коми: *а* — променевий каскад, ознака наявності коми; *б* — прояв коми в системі гіперболоїда в результаті негативного відхилення від фокусу (штрихпунктирна лінія) і в результаті позитивного відхилення (штрихова лінія)

Отже, можна зробити висновок, що потенціал гіперболічних відбивачів ще не розкритий. Проте існує чинник, який заважає створенню спопеляючої на відстані променевої надзброї, це — кома.

Кома — аберація третього порядку — з'являється в системі гіперболоїда в результаті розфокусування. На рис. 5, *а* показано віддзеркалення двох колінеарно спрямованих пучків променів з різних сторін гіперболи (видно каскадне вибудовування променів, які не потрапили у фокус, що є ознакою коми). У системі гіперболоїда кома перешкоджає утворенню ефекту колімації (рис. 5, *б*). Промені, які не потрапили у фокус, виходять з тої або іншої сторони системи дзеркал. На рис. 5, *б*, видно, що при негативному відхиленні від фокусу (штрихпунктирна лінія) промені, не доходячи до осі дзеркал, повертаються назад, а при позитивному відхиленні (штрихова лінія) промені не встигають вирівнятися паралельно осі, дійшовши до центру дзеркал, і виходять з іншої сторони.

Негативний вплив коми полягає в тому, що з кожною ітерацією промені проходять все далі від фокусів гіперболоїда. Варто зазначити, що при зворотньому процесі, коли з кожною ітерацією розфокусування зменшуватиметься, ефект буде аналогічний ефекту самофокусування у волоконних лазерах.

Спробуємо «впіймати» ефект колімації. На (рис. 6, *а*) показано сімейство гіпербол з кутом асимптоти $\gamma = 5\,° \div 85\,°$, які мають загальний

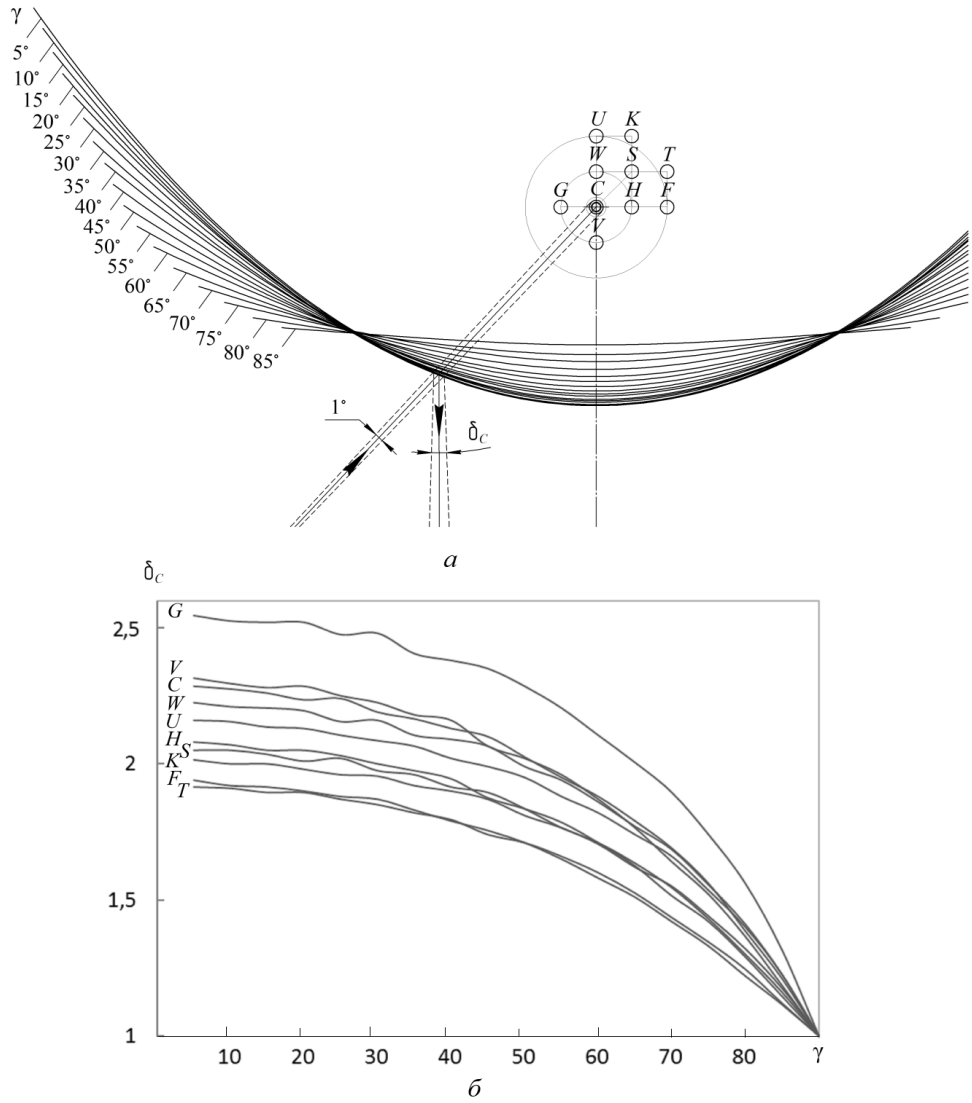


Рис. 6. Аберації при віддзеркаленні випромінювання від гіперболи: *а* — гіперболи з кутами асимптот γ і фокуси зміщення *U*, *K*, *W*, *S*, *T*, *G*, *C*, *H*, *V*; *б* — графік залежності аберації відхилень δ_C від кута асимптоти γ в точках зміщення

фокус (співпадає з фокусом *C*). Гіперболи масштабовані так, якщо б вони були вторинним відбивачем системи сонячного енергетичного концентратора. У фокус *C* падає промінь, який зміщується в обидві сторони від фокусу на кут 0,5 ° (штрихова лінія), імітуючи аберацію, відбитий промінь від вторинного дзеркала з аберацією δ_C. Подивимося, як змінюватиметься значення δ_C при віддзеркаленні від кожної гіперболи, зміщуючи сімейство гіпербол відносно точки *C*.

На графіку (рис. 6, *б*) видно, що при зміщенні ліворуч (точка *G*) аберація зростає. Логічно, що при зміщенні праворуч (точка *H*) аберація зменшується, при цьому криві в точках *G* і *H* дзеркально розташовані відносно фокусу *C*. При зміщенні вниз картина аберації не змінюється — крива *V* практично співпадає з кривою *C*. Найменша аберація спостерігається в точках *F* і *T*, що можна пояснити зміщенням в область з конічним характером кривизни гіперболи (див. рис. 3, *3*). На користь цього свідчить також факт збільшення аберації при малих кутах асимптоти. При цих кутах помітні деякі флуктуації, що викликано сферичною складовою кривизни гіпербол.

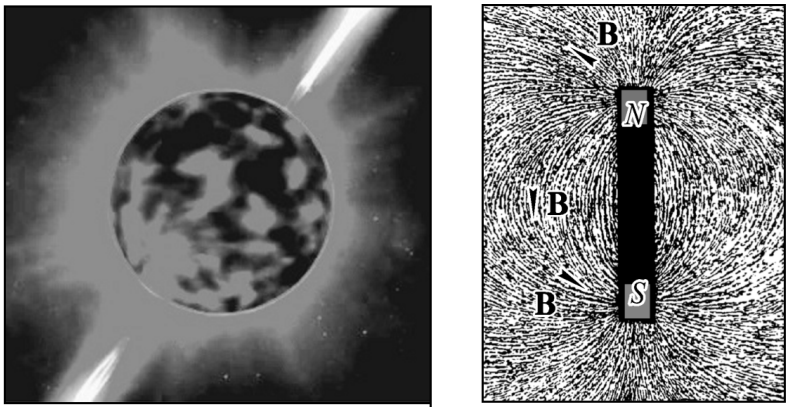
Таким чином, з огляду на те, що аберація в тій або іншій мірі має тенденцію збільшення, в системі дзеркал гіперболоїда другого порядку це викличе лавиноподібно наростаючу кому. Слід зазначити, що досліджувалися гіперболи з позитивною кривизною, які у будь-якому випадку збільшуватимуть аберацію, але застосування у складі гіперболоїда гіперболи з негативною кривизною нічого не змінює, оскільки в парі з нею доведеться використовувати дзеркало з позитивною кривизною, причому з малим кутом асимптоти.

Але попри все в природі існує об'єкт, який випромінює якісно колімовані потоки, це — магнітар (рис. 7, *а*). Сучасній науці невідомий процес формування цих потоків випромінювання, названих «джетами». Джети є невід'ємними ознаками існування нейтронних зорь: пульсарів, магнітарів і навіть квазарів — надмасивних чорних дір.

Пульсари виявлені в 1967 р. за допомогою вузьконаправлених пучків випромінювання, які вони випромінювали при обертанні. Але існування нейтронних зорь теоретично було передбачене до відкриття спостерігачами. Вперше гіпотези про можливість існування об'єктів з навколоатомною щільністю речовини в міжзоряному просторі були висунуті в 1932 р. Л. Ландау [10]. Теоретичну можливість існування тіл з надсильним магнітним полем розглядав в 1916 р. К. Шварцшильд, який ввів поняття «гравітаційний радіус» — радіус сфери, де розташовано горизонт подій, що створюється цією масою.

В сучасних теоріях утворення джетів стверджується, що джети вириваються безпосередньо з надщільного ядра, чого не може бути, оскільки межі сфери Шварцшильда не можуть покинути ніякі частки, і навіть електромагнітне випромінювання. Отже, колімовані потоки формуються в магнітному полі за межами горизонту подій.

Магнітне поле будь-якого космічного гравітаційного тіла має конфігурацію диполя (рис. 7, *б*), яке може бути описане за допомогою закону Кулона для електричних зарядів: сила взаємодії двох точкових електрич-



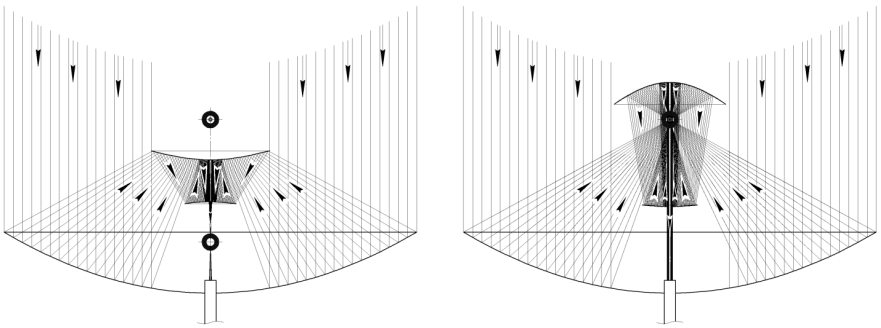
а *б*

Рис. 7. Магнітар (*а*) та картина магнітного поля, отримана за допомогою металевої стружки (*б*) [9]

них зарядів прямо пропорційна їх величинам і обернено пропорційна квадрату відстані між ними [11]. Тут слід звернути увагу на схожість із законом зворотних квадратів, за яким формується гіперболічна траєкторія (див. рис. 3). Це дозволяє вважати, що магнітні силові лінії мають гіперболічний характер кривизни, оскільки формуються в полі, яке убуває за законом зворотних квадратів з однією відмінністю, а саме вектором магнітної індукції **B,** який вносить складову третього порядку в кривизну магнітних силових ліній. Швидкість повороту вектора **B** від одного полюса до іншого постійна. Отже, кривизна третього порядку має сферичний характер.

Ейлер відносить усі криві третього порядку до 16 видів гіпербол, залежно від положення асимптот і прямої, що сполучає точки перетину кривої з асимптотами [12]. У загальному випадку крива третього порядку є гіперболою, яка має змінний кут асимптот. Насправді, в усіх природних процесах з гіперболічними утвореннями (див. рис. 3, 4) присутня складова третього і вищого порядків. Наприклад, траєкторія руху астероїда в гравітаційному полі може бути складніша, викликана впливом різних сил, а саме прецесії навколо своєї осі, при цьому завжди зберігається гіперболічний характер кривизни. Цікаво, що кривизна відбиваючої гіперболічного утворення (див. рис. 4, *в*) нагадує фрагмент кривизни силових ліній магнітного поля (див. рис. 7, *б*).

Уперше поверхні високого порядку використовував К. Шварцшильд [13] у своїх астрономічних телескопах, додаючи до рівняння другого порядку поправку у вигляді полінома за мірами радіальної координати поверхні. У його оптичних системах була вирішена як сферична аберація, так і кома. Такі системи носять назву апланати. Умова відсутності коми по



а *б*

Рис. 8. Основні типи сонячних енергетичних концентраторів-коліматорів: *а* — імплозивні коліматори; *б* — експлозивні коліматори

Шварцшильду це постійність фокусних відстаней різних зон відбивача. У свою чергу, це дорівнює наступній вимозі: задня головна поверхня оптичної системи, вільної від коми, має бути сферою, концентричною її задньому фокусу [5].

Апланатична поверхня — оптична поверхня, при заломленні або віддзеркаленні від якої світловий пучок не піддається аберацийним спотворенням. У апланатичних точках немає ні коми, ні астигматизму. Будь-який промінь, що йде в точку, після віддзеркалення від апланатичної поверхні потрапить у зв'язану точку. Цього легше досягти при використанні дзеркал з негативною кривизною.

Системи енергетичних концентраторів-коліматорів можна розділити на два основні типи: імплозивні (рис. 8, *а*) і експлозивні (рис. 8, *б*). Вони відрізняються способом входження випромінювання в систему дзеркал: в систему імплозивних коліматорів поступає пучок випромінювання, що сходиться, у систему експлозивних — той, що розходиться. Експлозивні коліматори дозволяють використовувати дзеркала з негативною кривизною.

Разом з тим, існують системи Річі—Кретьєна, які відомі відсутністю коми, при цьому в таких системах застосовано вторинний відбивач з позитивною кривизною. У системах Річі—Кретьєна застосовуються відбивачі з гіперболічною кривизною в якості як основного, так і вторинного дзеркала. Отже, за характером кривизни основного дзеркала імплозивні коліматори можна розділити на два типи: Кассегрена і Річі—Кретьєна.

У експлозивних коліматорах як вторинний відбивач з'являється можливість використовувати еліптичне дзеркало, що відносить такі коліматори до систем за типом Грегорі. В цьому випадку систему дзеркал коліматора можна скласти з двох зв'язаних за обома фокусами еліптичних дзеркал. Зазначимо, що незважаючи на принципову різницю, при використанні

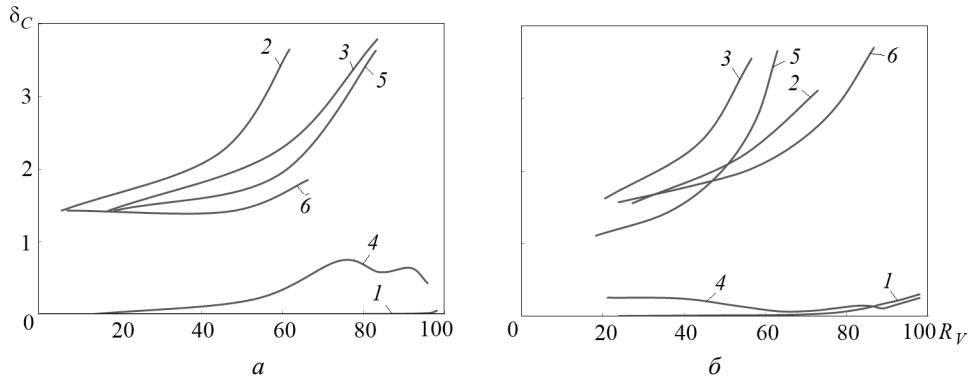


Рис. 9. Графік залежності аберації δ_C в системі дзеркал імплозивного (*а*), та експлозивного (*б*) коліматорів: *1—3* — криві аберацій дзеркал другого порядку; *4—6* — криві аберацій дзеркал третього порядку; *1, 4* — при попаданні у фокус; *2, 6* — при негативному відхиленні від фокусу; *3, 5* — при позитивному відхиленні від фокусу

дзеркал другого порядку кривизни такі системи за аберраційними характеристиками абсолютно аналогічні імплозивним коліматорам типу Кассегрена. Але при використанні дзеркал з високим порядком кривизни в цих системах проявляється істотна різниця.

Про це свідчать графіки аберацій в системі коліматорів при використанні дзеркал з кривизною третього порядку (рис. 9). Як бачимо, R_V — радіус-вектор, де значення 0 — це периферія асферичного дзеркала (область входу променів), а значення 100 — центр (полюс), область виходу потоку. Ефект колімації зберігається лише тоді, коли в області виходу потоку аберація має мінімальні значення. Така ситуація притаманна кривим *1* і *4*, коли промені при вході в систему дзеркал потрапляють у фокус. Коли промені входять з деяким відхиленням від фокусу (криві *2*, *3*, *5*, *6*), аберація лавиноподібно збільшується. Зворотний процес аналогічний ефекту самофокусування.

Слід зазначити, що застосування дзеркал з третім порядком кривизни сприяє зменшенню аберації (криві *4—6*). Краще при цьому себе поводять імплозивні коліматори (рис. 9, *а*), в яких навіть з'являється ефект самофокусування (криві *4* і *6*), що свідчить про практичну можливість створення самофокусування в системі дзеркал високого порядку кривизни. Для поліпшення картини аберації експлозивних коліматорів доцільно застосовувати не гіперболічні, а еліптичні дзеркала.

Висновки

Передача променевої енергії на відстані є нетривіальним завданням. Достатньо ефективних і простих рішень в цій області наразі не існує. Вирішення поставленої задачі вимагає розробки концептуально нових оптич-

них систем, які дозволяють отримати ефект колімації зі збереженням енергетичної складової випромінювання. Дослідження показали, що основною проблемою таких систем є кома — аберація третього порядку, яку можна подолати за допомогою дзеркал з кривизною, описаною математичним виразом третього і вищого порядків.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. *Чернозьомов Є.С.* Кобальтовий гіперболоїд. Моделі енергетичного віддзеркалення в області кутів нормального падіння // Електрон. моделювання, 2022, 44, №3, с. 31—41.
2. *Слюсарев Г.Г.* О возможном и невозможном в оптике. / Под ред. С.И. Вавилова. М.: Изд.-во АН СССР, 1944, 53 с.
3. Патент на винахід 120802, Україна, МПК (2020.01) F24S 10/00, G02B 6/00, F24S 20/20 (2018.01), F24S 23/00. Пристрій для концентрації і передачі сонячного випромінювання / Чернозьомов Є.С. № a 2018 06907; заяв. 20.06.2018; опубл. 10.02.2020, Бюл. № 3.
4. Патент на корисну модель 149777, Україна, МПК (2021.01) F24S 10/00, F24S 20/00, F24S 23/00, G02B 6/00. Концентратор-коліматор сонячного випромінювання на основі гіперболоїда / Чернозьомов Є.С. № u 2021 04520; заяв. 04.08.2021; опубл. 01.12.2021, Бюл. № 48.
5. *Михельсон Н.Н.* Оптика астрономических телескопов и методы ее расчета. / М.: ФИЗМАТЛИТ, 1995, 333 с.
6. *Козелков А.С.* Эффекты, сопровождающие вхождение астероида в водную среду // ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева 2014, № 3(105), с. 48—77.
7. *Nicholson U, Bray VJ, Gulick SPS, Aduomahor B*. The Nadir Crater offshore West Africa: A candidate Cretaceous-Paleogene impact structure // Sci Adv. 2022, 8(33).
8. Атомный проект СССР: документы и материалы: В 3-х томах / Под общ. ред. Л.Д. Рябева. 1998—2010. Т. 3. Водородная бомба, 1945—1956. Кн. 2 / Гос. корпорация по атом. энергии «Росатом»; сост.: Г.А. Гончаров (отв. сост.), П.П. Максименко. 2009, 596 с.
9. *Бутиков Е.И., Кондратьев А.С.* Физика. Электродинамика. Оптика. / Учеб. пособие: В 3 кн. Кн. 2. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004, 336 с.
10. *Ландау Л.Д.* К теории звезд // Phys. Zs. Sowjet, 1932, 1, 285 с.
11. *Кузьмичев В.Е.* Законы и формулы физики / Отв. ред. В.К. Тартаковский. Киев: Наук. думка, 1989, 864 с.
12. *Смогоржевский А.С., Столова Е.С.* Справочник по теории плоских кривых третьего порядка. М.: Гос. изд-во физ.-мат. лит., 1961, 864 с.
13. *Теребиж В.Ю.* Современные оптические телескопы. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2005, 65 с.

Отримано 14.02.2023

REFERENCES

1. Chernozomov E.S. (2022), Cobaltic hyperboloid. Models of energy reflection in the region of normal incidence angles // Electron. modeling, Vol. 44, no. 3, pp. 31-41.
2. Slyusarev G.G. (1944), *O vozmozhnom i nevozmozhnom v optike* [On the possible and impossible in optics], Publishing House of the Academy of Sciences of the USSR.
3. Chernozomov, E.S. (2018), Patent for invention 120802, Ukraine, IPC (2020.01) F24S 10/00, G02B 6/00, F24S 20/20 (2018.01), F24S 23/00 “Device for concentration and transmission of solar radiation”, 06907; application date June 20, 2018; publication date February 10, 2020; Bulletin no. 3.

4. Chernozomov, E.S. (2021), Patent for utility model 149777, Ukraine, IPC (2021.01) F24S 10/00, F24S 20/00, F24S 23/00, G02B 6/00 “Concentrator-collimator of solar radiation based on hyperboloid”, 04520; application date August 04, 2021; publication date December 01, 2021; Bulletin no. 48.
5. Mikhelson N.N. (1995), Optica astronomicheskih telescopov i metody ih rschiota [Optics of astronomical telescopes and methods of its calculation], Fizmatlit, Moscow, Russia.
6. Kozelkov A.S. (2014), "Effects accompanying the entry of an asteroid into the aquatic environment", Federal State Unitary Enterprise RFNC-VNIIEF. Proceedings of NSTU im. R.E. Alekseeva, Vol 3, no. 105, pp. 48-77.
7. Nicholson U, Bray VJ, Gulick SPS and Aduomahor B. The Nadir Crater offshore West Africa: A candidate Cretaceous-Paleogene impact structure. / Sci Adv. 2022, 8(33)
8. Atomic project of the USSR: documents and materials: in 3 volumes / Ed. ed. L.D. Ryabeva. 1998-2010. Vol. 3. Hydrogen bomb, 1945 - 1956. Book. 2 / State. atom corporation. Energy "Rosatom"; comp.: G.A. Goncharov (responsible comp.), P.P. Maksimenko. 2009, 596 p.
9. Butikov E.I. and Kondratiev A.S. (2004), PHYSICS: Proc. allowance: In 3 books. Book 2. Electrodynamics. Optics, Fizmatlit, Moscow, Russia.
10. Landau L.D. (1932), O teorii zviozd [On the theory of stars] Phys. Zs., Sowjet,
11. Kuzmichev, V.E. (1989), *Zakony i formuly fiziki* [Laws and formulas of physics], Naukova dumka, Kiev, USSR.
12. Smogorzhevsky A.S. and Stolova E.S. (1961), *Spravochnik po teorii ploskih krivyh tretyogo poryadka* [Handbook on the theory of plane curves of the third order], State publishing house of physical and mathematical literature, Moscow, Russia.
13. Terebizh V.Yu. (2005), *Sovremennye opticheskie telescopy* [Modern optical telescopes], Fizmatlit, Moscow, Russia.

Received 14.02.2023

Y.S. Chernozomov

MODELS OF ABERRATIONS
OF HYPERBOLIC REFLECTORS OF THE 2ND AND HIGHER ORDER
OF CURVATURE IN BEAM ENERGY TRANSMISSION SYSTEMS

The processes of ray energy transfer using hyperbolic formations and the accompanying effects are considered. A new concept of the optical system of a solar energy concentrator and varieties within its framework are proposed, aberrations that occur in such systems and the possibility of transmitting ray energy using a hyperboloid system consisting of surfaces of the second and higher order are considered. The possibility of creating the effect of self-focusing in mirror optical systems is considered.

K e y w o r d s: laser, self-focusing effect, collimation, hyperboloid, asteroid escaping, explosion, implosion, magnetar, aplanats

ЧЕРНОЗЬОМОВ Євген Сергійович, аспірант Інституту проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова НАН України. У 2008 р. закінчив Східноукраїнський національний університет ім. В.І. Даля (м. Сєвєродонецьк). Область наукових досліджень — засоби ефективного використання джерел поновлюваної енергії, аналітичні системи моделювання.