

УДК 004.925.8; 514.8

ДОСЛІДЖЕННЯ ГЕОМЕТРИЧНИХ СХЕМ БАГАТОШАРОВОГО ОПТИЧНОГО СЕРЕДОВИЩА

Шоман О.В., д.т.н.,

olgasho@ukr.net, ORCID: 0000-0002-3660-0441

Даниленко В.Я.,

vladdanyl@ukr.net, ORCID: 0000-0003-4952-7498

Національний технічний університет

«Харківський політехнічний інститут» (Україна)

Системи об'єктів, де використовують оптичне випромінювання та досліджують особливості його взаємодії з цими об'єктами, пов'язано з багатьма галузями науково-практичних досліджень в медицині, фармації, біофотометрії, хімії, світлотехніці та ін. Це і методи діагностики, і методи аналізу складу речовин, і методи вимірювань інтенсивності світла. Спільним для такого виду задач, в яких необхідно визначити інтенсивність або світла, або ультрафіолетового (УФ), або інфрачервоного (ІЧ) випромінювання, що пройшло крізь шар речовини, є присутність у розрахунках показників поглинання, відбиття, величин концентрації, довжин хвиль, товщин шарів речовин (глибин проникнення) та ін. На основі аналізу досліджень, в яких вимірюється зміна інтенсивності оптичного випромінювання, спрямованого на об'єкт (середовище), з'ясовано доцільність врахування геометричних елементів і границь оптичного середовища в моделюванні схем експерименту. При цьому окремою задачею є обробка експериментальних даних (результатів вимірювань). Ці результати можна вважати точними, якщо проведення вимірювань «на вході» приведено до певних відомих або «ідеальних» умов і порівняно з відповідним «класичним» розрахунком. В багатьох випадках задля цього використовують закон Бугера–Ламберта–Бера. Задачі моделювання взаємодії випромінювання з досліджуваним об'єктом можна поділити за ступенем складності геометричних схем та складових таким чином: для елементарних геометричних об'єктів; для границь (поверхонь) шару; для обох границь одного шару певної речовини, крізь який проходить випромінювання; для границь шару та домішок в речовині; для багатошарового середовища (більше двох границь); для середовища з затіненням об'єктів (коли на шляху випромінювання зустрічаються об'єкти-перешкоди, що затіняють, тобто «перекривають» фрагменти границь шарів або частки досліджуваної речовини в шарі або створюють ефект «помутніння» середовища). Для аналітичного опису незакономірних поверхонь об'єктів в багатьох задачах моделювання добре зарекомендували себе методи з використанням нормальних рівнянь. Це стосується і моделювання гетерогенних систем (якими і є неоднорідні

багатошарові оптичні середовища), і систем об'єктів, що взаємодіють з оптичним випромінюванням. Зважаючи на вказане, доцільним є приведення таких задач до суто геометричних задач опису поверхонь границь шарів та об'єктів всередині. Наведена своєрідна за геометричною сутністю класифікація задач, яку віднесено до класифікації (видів) задач у дослідженнях проходження оптичного випромінювання крізь шари речовини, вибудовує ієрархічну структуру моделювання границь і елементів оптичних середовищ.

Ключові слова: геометричне моделювання, оптичне середовище, оптичне випромінювання, граничні поверхні, нормальні рівняння.

Постановка проблеми. Моделювання систем об'єктів, в яких використовують оптичне випромінювання та досліджуються особливості його взаємодії з цими об'єктами, пов'язано з багатьма галузями науково-практичних досліджень в медицині, фармації, біофотометрії, хімії, світлотехніці та ін. Це і методи діагностики, і методи аналізу складу речовин, і методи вимірювань інтенсивності світла. Спільним для такого виду задач, в яких необхідно визначити інтенсивність або світла, або ультрафіолетового (УФ), або інфрачервоного (ІЧ) випромінювання, що пройшло крізь шар речовини, є присутність у розрахунках показників поглинання, відбиття, величин концентрації, довжин хвиль, товщин шарів речовин (глибин проникнення) та ін. При цьому відбиттям часто нехтують, випромінювання використовують монохромне (певних довжин хвиль). Як правило, точні результати щодо вмісту якоїсь речовини, наприклад, у певному досліджуваному розчині, одержують, якщо досліджується один компонент (речовина певного типу) в цьому розчині. Це пов'язано з тим, що для певної концентрації та певної товщини шару є точно відомим показник поглинання. Тоді результати експерименту порівнюють з лабораторними даними, одержаними з попередньо встановленими значеннями вказаних показників. За наявності змін у вимірах інтенсивності оптичного випромінювання, пройденого крізь шар (у порівнянні з початковим, відомим значенням цієї інтенсивності), визначаються дані про вміст досліджуваної речовини у розчині. З точки зору побудови схеми експерименту складовими даними мають бути границя шару речовини, геометрична форма цієї границі, а також елементи-домішки всередині речовини, які впливають на результуюче значення інтенсивності випромінювання, що проходить крізь шар конкретної речовини.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. В роботах [1–4] було досліджено геометричні моделі об'єктів енергообміну випромінюванням. В основу моделювання покладено поняття множин, операцій над множинами, аналітичні описи об'єктів за допомогою R-функцій. Це дало змогу розробити загальний підхід до аналітичного подання різних геометричних об'єктів на площині і в просторі. В моделях розглядались випадки передачі випромінювання на видиму частину поверхонь об'єктів.

У роботі [5] проведено аналіз геометричної інформації в задачах взаємодії оптичного випромінювання з середовищем на прикладі біотканини, з'ясовано багатofакторність таких задач. Роботи [6–9] роз'яснюють цілі та умови експериментальних досліджень речовин, де важливою є точність одержуваних результатів. Приклад використання оптичного випромінювання та побудову моделі для розв'язання практичної задачі розпізнавання об'єктів контролю безпеки на авіаційному транспорті наведено в роботі [10]. З цього дослідження випливає важливість опису геометричних об'єктів, на які спрямовано дію випромінювання.

Формулювання цілей статті. На основі огляду задач, де вимірюється зміна інтенсивності оптичного випромінювання, спрямованого на об'єкт (середовище), з'ясувати доцільність врахування геометричних елементів і границь оптичного середовища в моделюванні схем експерименту.

Основна частина. Розглянемо різні типи задач і з'ясуємо умови для моделювання схем, де випромінювання оптичного діапазону довжин хвиль взаємодіє з елементами середовища.

В галузі медицини (неінвазійного моніторингу біологічних об'єктів), фармації, хімії, створення оптико-електронного обладнання для діагностичних цілей та ін., як правило, вивчення впливу оптичного випромінювання на біотканину, а також визначення вмісту тієї чи іншої речовини (наприклад, у розчині) потребують проведення експерименту [6-9]. При цьому окремою задачею є обробка експериментальних даних (результатів вимірювань). Ці результати можна вважати точними, якщо проведення вимірювань «на вході» приведено до певних відомих або «ідеальних» умов і порівняно з відповідним «класичним» розрахунком. В багатьох випадках для цього використовують закон Бугера–Ламберта–Бера [11–13]. За ним для конкретних «початкових» даних про вміст речовини (концентрацію), товщину шару та коефіцієнт поглинання визначається співвідношення інтенсивності монохроматичного випромінювання, що падає на границю (поверхню) шару речовини, та інтенсивності цього випромінювання, що пройшло крізь цей шар.

Закон Бугера–Ламберта–Бера описує формула [11]:

$$I_0 = I(l)e^{k_\lambda l}, \quad (1)$$

де I_0 – інтенсивність випромінювання, що падає на границю (поверхню) шару речовини; $I(l)$ – інтенсивність випромінювання, що пройшло крізь шар речовини; k_λ – коефіцієнт поглинання речовини для певної довжини хвилі λ ; l – товщина шару речовини.

Для шару речовини з неоднорідностями [8], тобто коли проводять визначення спектрограм реального об'єкта, використовують формулу:

$$I_0 = Ie^{\sum_{i=1}^N k_i n_i}, \quad (2)$$

де k_i – коефіцієнт поглинання випромінювання певної довжини хвилі i -ою

речовиною, що міститься у N -компонентному шарі; n_i – кількість i -ої речовини в цьому шарі.

Задачі моделювання взаємодії випромінювання з досліджуваним об'єктом можна поділити за ступенем складності геометричних схем та складових таким чином: для елементарних геометричних об'єктів; для границі (поверхні) шару; для обох границь одного шару певної речовини, крізь який проходить випромінювання; для границь шару та домішок в речовині; для багатошарового середовища (більше двох границь); для середовища з затіненням об'єктів (коли на шляху випромінювання зустрічаються об'єкти-перешкоди, що затіняють, тобто «перекривають» фрагменти границь шарів або частки досліджуваної речовини в шарі, або створюють ефект «помутніння» середовища).

В практиці лабораторних вимірювань, наприклад, при дослідженнях товарів (зокрема, харчових продуктів) [12], використовують методи однокомпонентного, двокомпонентного та багатокомпонентного аналізу (останній є найбільш інформативним). Як бачимо, підстави для розподілу задач тут є аналогічними розподілу задач за складністю об'єктів в геометричних схемах.

Розгляд застосувань методів фотометрії та спектрофотометрії в дослідженнях речовин, у свою чергу, приводить до необхідності проведення геометричного аналізу досліджуваних систем речовин.

Можна назвати такі проблеми (які є схожими для різних галузей): побудова геометричних схем взаємодії оптичного випромінювання з речовиною, опис елементів середовища (його структури, геометричної форми складових), графічне подання експериментальних даних (вимірювань) та візуалізація.

В експериментах для визначення зміни величин інтенсивностей випромінювання використовується (як геометричний «параметр») тільки товщина шару. Не враховується нерівномірність цієї товщини та можливі затінення. А при застосуванні ж геометричних підходів до моделювання такі складові враховуються і навіть окремо досліджуються.

Для аналітичного опису незакономірних поверхонь об'єктів в багатьох задачах моделювання добре зарекомендували себе методи з використанням нормальних рівнянь [14]. Хоча на початку моделювання, навіть для задання вихідних умов, це досить трудомісткий процес, з використанням нормальних рівнянь, побудованих для різних типів об'єктів, створюються умови точного визначення та візуального подання сімей паралельних геометричних об'єктів. У тому числі це стосується моделювання гетерогенних систем (якими і є неоднорідні багатошарові оптичні середовища) і систем об'єктів, що взаємодіють з оптичним випромінюванням. Зважаючи на вказане, доцільним є приведення таких задач до суто геометричних задач опису поверхонь границь шарів та об'єктів всередині.

На рис. 1 подано паралельні геометричні об'єкти, які пропонується

ввести до систем об'єктів, що взаємодіють з оптичним випромінюванням.

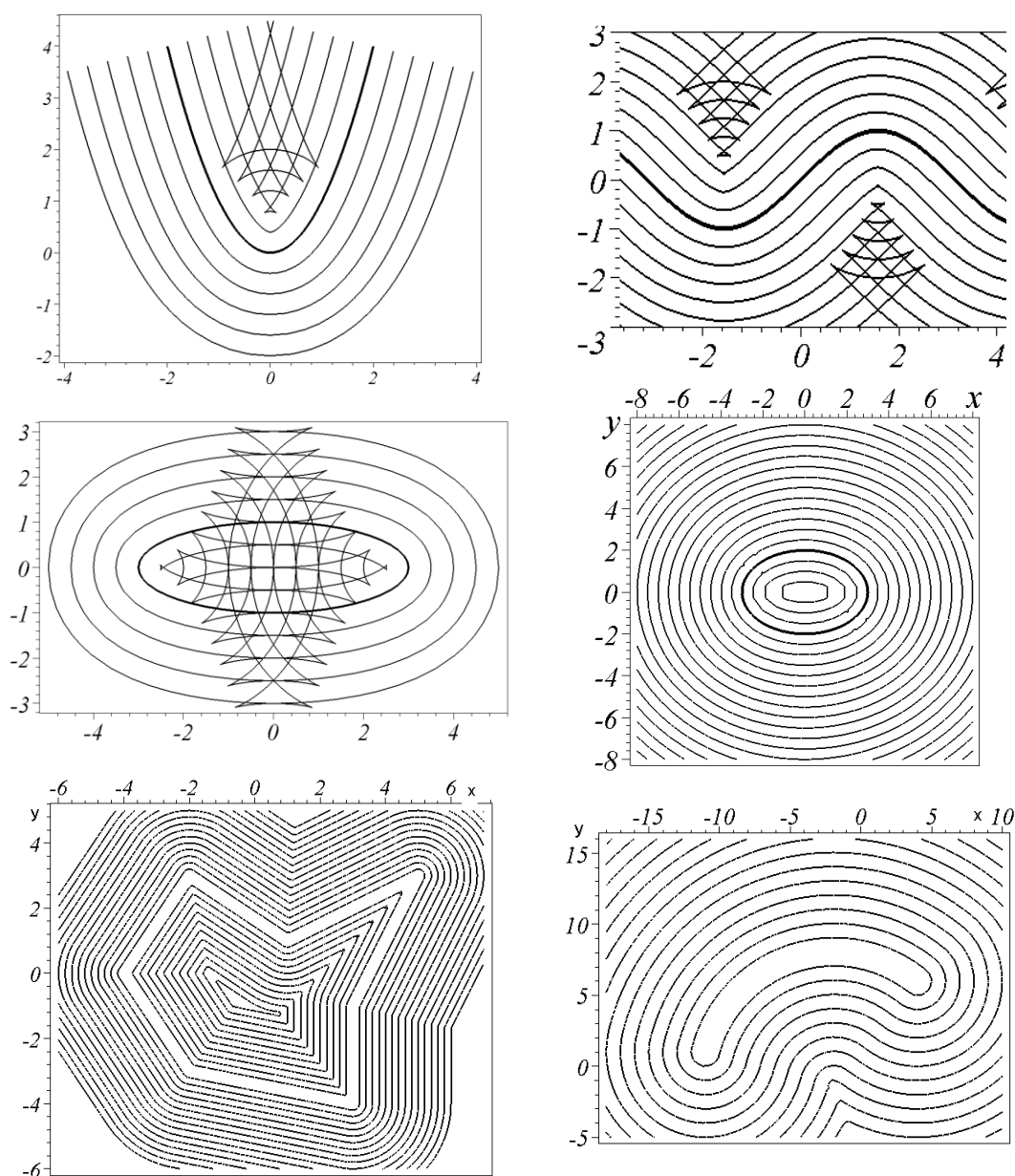


Рис. 1. Паралельні геометричні об'єкти

Висновки. Наведена своєрідна за геометричною сутністю класифікація задач, яку віднесено до класифікації (видів) задач у дослідженнях проходження оптичного випромінювання крізь шари речовини, вибудовує ієрархічну структуру моделювання границь і елементів оптичних середовищ. Якщо в умовах лабораторного експерименту для багатоконпонентного аналізу використовують покроково двокомпонентний аналіз, то, за аналогією, геометричні схеми проходження оптичного випромінювання вибудовуються покроково від однієї границі шару або елементів-домішок до іншої границі.

Література

1. Куценко Л.Н., Шоман О.В. Приближенный метод вычисления локальных угловых коэффициентов излучения. *Прикладна геометрія та інженерна графіка: Збірник наукових праць*. Київ: КДТУБА, 1996. Вип. 60. С. 46–49.
2. Шоман О.В., Самарін В.О., Легета Я.П. Самоопромінення каналової поверхні. *Прикладна геометрія та інженерна графіка: Збірник наукових праць*. Київ: КНУБА, 2009. Вип. 82. С. 73–79.
3. Кукуруза Д.В. Геометричне моделювання розподілу значень локальних кутових коефіцієнтів випромінювання на множині точок площини : автореф. дис... канд. техн. наук: 05.01.01 / Київський нац. унів. будівництва і архітектури. Київ, 2007. 20 с.
4. Шоман О.В., Дашкевич А.О., Даниленко В.Я. Визначення форм-факторів передачі променевої енергії. *Комп'ютерно-інтергровані технології: освіта, наука, виробництво: Науковий журнал*. 2015. № 19. С. 167–172.
5. Шоман О.В., Даниленко В.Я. Аналіз геометричної інформації, що використовується в моделюванні взаємодії оптичного випромінювання з середовищем. *Сучасні проблеми моделювання: Збірник наукових праць*. Мелітополь, 2020. Вип. 19. С. 194–201.
6. Кожем'яко В.П., Турлюк А.В., Яровенко А.О. Порівняльний аналіз методів та середовищ для неінвазивного моніторингу біологічних об'єктів. *Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології: Міжнар. наук.-техн. журнал*. Вінниця, 2011. № 2. С. 118–126. Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/oeiet_2011_2_17.
7. Ростока Л.М., Бобонич Е.П., Кудрявцев М.М., Сіткар А.Д., Пічкарь Й.І., Горленко О.М. Оптичні методи діагностики в медицині. *Проблеми клінічної педіатрії: Науковий журнал*. Ужгород, 2017. № 3–4 (37–38). С. 106–111. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/pkr_2017_3-4_19.
8. Шнідковський Р.В., Ключко Т.Р. Дослідження інфрачервоного спектроскопічного методу для діагностики перевищення вмісту глюкози в крові. *Збірник праць XVI Всеукраїнської науково-практичної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених «Ефективність та автоматизація інженерних рішень у приладобудуванні»* (м. Київ, 08–09 грудня 2020 р.). Київ: ПБФ, КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. С. 352–355. URL: https://pbf.kpi.ua/ua/wp-content/uploads/2021/03/inzh_rishenia_2020.pdf.
9. Павлов С.В., Козловська Т.І., Василенко В.Б. Оптико-електронні засоби діагностування патологій людини, пов'язаних із периферичним кровообігом: монографія. Вінниця: ВНТУ, 2014. 140 с.
10. Чепіженко В.І., Терещенко Л.Ю. Моделювання оптичного зображення внутрішньої структури об'єктів контролю. *Проблеми інформатизації та управління: Збірник наукових праць*. Київ, 2016. Т.2, № 54. С. 73–81. URL: <http://jrnl.nau.edu.ua/index.php/PIU/article/view/10875/14505>

11. Абсорбційна (поглинальна) спектроскопія. Фармацевтична енциклопедія. URL: <https://www.pharmencyclopedia.com.ua/article/2603/absorbciyna>
12. Щербакова Т.В., Дейниченко Г.В. Методи дослідження товарів: конспект лекцій. Харків: ХДУХТ, 2017. 103 с. URL: elib.hduht.edu.ua/bitstream/123456789/2375/1/МДТ_Конспект_лекцій_07.02.18.pdf.
13. Приходько Ю.О., Криванич О.В., Бевз О.В., Перехода Л.О. Розробка методик визначення гліцину в готових лікарських засобах. *Сучасні концепції викладання природничих дисциплін у медичних освітніх закладах: матеріали XIII Міжнародної науково-методичної інтернет-конференції* (м. Харків, 25 листопада 2020 р.). Харків: ХНМУ, 2020. С. 115–117. Режим доступу: <http://repo.knmu.edu.ua/handle/123456789/27708>.
14. Шоман О.В. Паралельні множини в геометричному моделюванні явищ і процесів: монографія. Харків: НТУ «ХПІ», 2007. 288 с.

ИССЛЕДОВАНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ СХЕМ МНОГОСЛОЙНОЙ ОПТИЧЕСКОЙ СРЕДЫ

Шоман О.В., Даниленко В.Я.

Системы объектов, где используют оптическое излучение и исследуют особенности его взаимодействия с этими объектами, связано с многими областями научно-практических исследований в медицине, фармации, биофотометрии, химии, светотехнике и др. Это и методы диагностики, и методы анализа состава веществ, и методы измерений интенсивности света. Общим для такого вида задач, в которых необходимо определить интенсивность либо света, либо ультрафиолетового (УФ), либо инфракрасного (ИК) излучения, прошедшего через слой вещества, является наличие в расчетах показателей поглощения, отражения, величин концентрации, длин волн, толщин слоев веществ (глубин проникновения) и др. На основе анализа исследований, в которых измеряется изменение интенсивности оптического излучения, направленного на объект (среду), выяснена целесообразность учета геометрических элементов и границ оптической среды в моделировании схем эксперимента. При этом отдельной задачей является обработка экспериментальных данных (результатов измерений). Эти результаты можно считать точными, если проведение измерений «на входе» приведено к определенным известным или «идеальным» условиям и сравнено с соответствующим «классическим» расчетом. Во многих случаях для этого используют закон Бугера–Ламберта–Бера. Задачи моделирования взаимодействия излучения с исследуемым объектом можно разделить по степени сложности геометрических схем и составляющих следующим образом: для

элементарных геометрических объектов; для границ (поверхностей) слоя; для обеих границ одного слоя определенного вещества, сквозь который проходит излучение; для границ слоя и примесей в веществе; для многослойной среды (больше двух границ); для среды с затенением объектов (когда на пути излучения встречаются затеняющие объекты-препятствия, т.е. «перекрывающие» фрагменты границ слоев или части исследуемого вещества в слое или создающие эффект «помутнения» среды). Для аналитического описания незакономерных поверхностей объектов во многих задачах моделирования хорошо зарекомендовали себя методы с использованием нормальных уравнений. Это касается и моделирования гетерогенных систем (какими и есть неоднородные многослойные оптические среды), и систем объектов, взаимодействующих с оптическим излучением. Учитывая сказанное, рациональным является приведение таких задач к чисто геометрическим задачам описания поверхностей границ слоев и объектов внутри. Приведенная своеобразная по геометрической сути классификация задач, которая соотнесена с классификацией (видами) задач в исследованиях прохождения оптического излучения сквозь слои вещества, выстраивает иерархическую структуру моделирования границ и элементов оптических сред.

Ключевые слова: геометрическое моделирование, оптическая среда, оптическое излучение, граничные поверхности, нормальные уравнения.

STUDY OF GEOMETRIC SCHEMES OF MULTILAYER OPTICAL MEDIUM

Olga Shoman, Volodymyr Danylenko

Systems of objects, which use optical radiation and study the features of its interaction with these objects, are associated with many areas of scientific and practical research in medicine, pharmacy, biophotometry, chemistry, lighting, etc. These are methods of diagnosis, and methods of analysis of the composition of substances, and methods of measuring the intensity of light. Common to this type of problem, in which it is necessary to determine the intensity of either light or ultraviolet (UV) or infrared (IR) radiation passing through the layer of matter, is the presence of absorption, reflection, concentration, wavelength, layer thickness substances (depths of penetration), etc. in the calculations. Based on the analysis of studies that measure the change in the intensity of optical radiation directed at the object (medium), the expediency of taking into account the geometric elements and boundaries of the optical medium in the modeling of experimental schemes. A separate task is the processing of experimental data (measurement results). These results can be considered accurate if the measurements "at the input" are reduced to certain known or "ideal" conditions and compared with the corresponding "classical" calculation. In many cases, the Bouguer-Lambert-Beer law is used for this

purpose. The problems of modeling the interaction of radiation with the object under study can be divided according to the degree of complexity of geometric schemes and components as follows: for elementary geometric objects; for the boundaries (surfaces) of the layer; for both boundaries of one layer of a certain substance through which radiation passes; for the boundaries of the layer and impurities in the substance; for a multilayer medium (more than two boundaries); for the medium with shading of objects (when in the path of radiation there are objects-obstacles that shade, i.e. "overlap" fragments of the boundaries of the layers or particles of the test substance in the layer, or create the effect of "turbidity" of the medium). Methods using normal equations have proved themselves well in many modeling problems for the analytical description of irregular surfaces of objects. This includes the modeling of heterogeneous systems (which are inhomogeneous multilayer optical media) and systems of objects that interact with optical radiation. In view of the above, it is expedient to reduce such problems to purely geometric problems of describing the surfaces of the boundaries of layers and objects inside. The geometric essence of the classification of problems, which corresponds to the classification (types) of problems in studies of the passing of optical radiation through layers of matter, builds a hierarchical structure of modeling the boundaries and elements of optical media.

Key words: geometric modeling, optical medium, optical radiation, boundary surfaces, normal equations.

References

1. Kutsenko, L.N., & Shoman, O.V. (1996). Approximate Method for Calculating Local Radiation Coefficients. *Prykladna heometriia ta inzhenerna hrafika*, 60, 46–49 [in Russian]
2. Shoman, O.V., Samarin, V.O., & Leheta, Ya.P. (2009). Self-irradiation of the channel surface. *Prykladna heometriia ta inzhenerna hrafika*, 82, 73–79 [in Ukrainian]
3. Kukuza, D.V. (2007). *Geometric modeling of the distribution of values of local angular coefficients of radiation on the set of points of the plane*. Extended abstract of candidate's thesis. Kyiv: KNUBA [in Ukrainian]
4. Shoman, O.V., Dashkevich, A.A., & Danylenko, V.Ya. (2015). Determination of form factors of radial energy transmission. *Kompiuterno-interhrovani tekhnolohii: osvita, nauka, vyrobnytstvo*, 19, 167–172 [in Ukrainian]
5. Shoman, O.V., & Danylenko, V.Ya. (2020). Analysis of geometric information used in modeling the interaction of optical radiation with the medium. *Suchasni problemy modeliuвання*, 19, 194–201 [in Ukrainian]
6. Kozhemiako, V.P., Turliuk, A.V., & Yarovenko, A.O. (2011). Comparative analysis of methods and environments for non-invasive monitoring of biological objects. *Optyko-elektronni informatsiino-enerhetychni tekhnolohii*, 2, 118–126. Retrieved from:

- http://nbuv.gov.ua/UJRN/oeiet_2011_2_17 [in Ukrainian]
7. Rostoka, L.M., Bobonych, E.P., Kudriavtsev, M.M., Sitkar, A.D., Pichkar, Y.I., & Horlenko, O.M. (2017). Optical diagnostic methods in medicine. *Problemy klinichnoi pediatrii*, 3–4 (37–38), 106–111. Retrieved from: http://nbuv.gov.ua/UJRN/pkp_2017_3-4_19 [in Ukrainian]
 8. Shnidkovskiy, R.V., & Klochko, T.R. (2020). Investigation of infrared spectroscopic method for the diagnosis of excess blood glucose. *Zbirnyk prats XVI Vseukrainskoi naukovo-praktychnoi konferentsii studentiv, aspirantiv ta molodykh vchenykh «Efektyvnist ta avtomatyzatsiia inzhenernykh rishen u pryladobuduvanni»* (pp. 352–355). Kyiv: PBF, KPI im. Ihoria Sikorskoho. Retrieved from: https://pbf.kpi.ua/ua/wp-content/uploads/2021/03/inzh_rishenia_2020.pdf [in Ukrainian]
 9. Pavlov, S.V., Kozlovska, T.I., & Vasylenko, V.B. (2014). *Optical-electronic means for diagnosing human pathologies related to peripheral blood circulation*. Vinnytsia: VNTU [in Ukrainian]
 10. Chepizhenko, V.I., & Tereshchenko, L.Yu. (2016). Optical image modeling of the internal structure of control objects. *Problemy informatyzatsii ta upravlinnia*, Vol. 2, 54, 73–81. Retrieved from: <http://jrnl.nau.edu.ua/index.php/PIU/article/view/10875/14505> [in Ukrainian]
 11. Absorption spectroscopy. *Farmatsevychna entsyklopediia*. Retrieved from: <https://www.pharmencyclopedia.com.ua/article/2603/absorbciyna>
 12. Shcherbakova, T.V., & Deinychenko, H.V. (2017). *Methods of research of goods*. Kharkiv: KhDUKht. Retrieved from: elibrary.hduht.edu.ua/bitstream/123456789/2375/1/МДТ_Конспект_лекцій_07.02.18.pdf [in Ukrainian]
 13. Prykhodko, Yu.O., Kryvanych, O.V., Bevz, O.V., & Perekhoda, L.O. (2020). Development of methods for the determination of glycine in finished drugs. *Suchasni kontseptsii vykladannia pryrodnychychk dystsyplin u medychnykh osvitynikh zakladakh: materialy XIII Mizhnarodnoi naukovo-metodychnoi internet-konferentsii* (pp. 115–117). Kharkiv: KhNMU. Retrieved from: <http://repo.knmu.edu.ua/handle/123456789/27708> [in Ukrainian]
 14. Shoman, O.V. (2007). *Parallel sets in geometric modeling of phenomena and processes*. Kharkiv: NTU «KhPI» [in Ukrainian]