

Изучение контролируемого электронного переноса через одиночную органическую молекулу/ С. В. Василюк, Ю. А. Мягченко// Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – No 50(1222). – С.29–36. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2079-5459.

Controlled study of electron transport through single organic molecule/ S. Vasylyuk, Y. Myahchenko//Bulletin of NTU “KhPI”. Series: Mechanical-technological systems and complexes. – Kharkov: NTU “KhPI”, 2016. – No 50 (1222).– P.29–36. – Bibliogr.: 10. – ISSN 2079-5459.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Василюк Світлана Вікторівна – аспірант, Кафедра експериментальної фізики фізичного факультету інженер, Кафедра молекулярної фізики, Київський національний університет імені Тараса Шевченка, вул. Володимирська, 60, м. Київ, Україна, 01033.

Мягченко Юрій Олександрович – Кандидат фізико-математичних наук, доцент, Кафедра експериментальної фізики фізичного факультету, Київський національний університет імені Тараса Шевченка, вул. Володимирська, 60, м. Київ, 01033

Василюк Светлана Викторовна – аспирант, Кафедра экспериментальной физики физического факультета, инженер, Кафедра молекулярной физики, Киевский национальный университет имени Тараса Шевченко; вул. Владимирская, 60, г. Київ, Украина, 01033.

Мягченко Юий Александрович – Кандидат физико-математических наук, доцент, Кафедра экспериментальной физики физического факультета, Киевский национальный университет имени Тараса Шевченко, ул. Владимирская, 60, г. Киев, Украина, 01033

Myahchenko Yurii – Associate Professor, Department of Experimental Physics, Department of Physics, Taras Shevchenko National University of Kyiv, Volodymyrska str., 60, Kyiv, Ukraine, 01033.

Vasylyuk Svitlana – graduate student, Engineer, Department of Molecular Physics, Taras Shevchenko National University of Kyiv; Volodymyrska str., 60, Kyiv, Ukraine, 01033.

УДК 535.2

П. С. ЗАДОРЖНИЙ

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОХОДЖЕННЯ СВІТЛА ЧЕРЕЗ НАПІВПРОЗОРИ СЕРЕДОВИЩА

Оскільки моделювання розповсюдження світла в середині напівпрозорих середовищ за допомогою звичайних методів має доволі значну похибку, потрібно розробити та узагальнити математичну модель що врахує всі процеси які впливають на розповсюдження світла в неоднорідних або напівпрозорих середовищах. Але враховуючи всю варіативну різноманітність середовищ важливо зауважити що для кожного окремого випадку варто розробляти індивідуальну математичну модель, що повною мірою зможе описати процес проходження випромінювання у видимому, УФ і ІЧ спектрах. В даній роботі буде розглянуте середовище у вигляді прибережної зони водойми.

Ключові слова: світлове поле, напівпрозоре середовище, неоднорідне середовище, прозорість, колоїдна система, математична модель.

Поскольку моделирование распространения света внутри полупрозрачной среды с помощью обычных методов имеет довольно значительную погрешность, нужно разработать и обобщить математическую модель что позволит учесть все процессы, воздействующие на распространение света в неоднородной или полупрозрачной среде. Но учитывая все вариативное разнообразие сред важно отметить что для каждого отдельного случая следует разрабатывать индивидуальную математическую модель, что в полной мере сможет описать процесс прохождения излучения в видимом, УФ и ИК диапазонах. В данной работе рассмотрена среда в виде прибережной зоны водоема.

Ключевые слова: световое поле, полупрозрачная среда, неоднородная среда, прозрачность, коллоидная система, математическая модель.

Since the simulation of light propagation within a semitransparent medium using conventional methods has a rather significant error, it is necessary to develop and generalize a mathematical model that will allow to take into account all processes affecting the propagation of light in an inhomogeneous or semitransparent medium. But taking into account all the variability of media, it is important to note that for each individual case, an individual mathematical model should be developed that will fully describe the process of radiation transmission in the visible, UV and IR ranges. In this paper, we consider the medium in the form of a coastal zone of a reservoir. In this paper, we analyze the radiation field in a layer of a semitransparent medium at the boundary of which collimated and noncollimating (diffuse) light flux falls. This model was used to calculate the radiation field in a reservoir, which is formed under the influence of the incident solar flux and radiation from the celestial vault. To solve the problem, an approach based on a modified method of average flows (AF-method) is considered. This method by its wide possibilities for taking into account the optical properties of the medium and boundaries along with the relative simplicity of the numerical algorithm. For solving the problem was proposed the S-transformation method, as another algorithm.

Keywords: light field, semitransparent medium, inhomogeneous medium, transparency, colloidal system, mathematical model.

Вступ. Інтерес до завдань побудови світлового та оптичного поля в напівпрозорих середовищах, де світлове поле формується падаючим колімуванням (вузконаправленим) випромінюванням, обумовлений їх широким практичним значенням. Наприклад, постановки таких завдань мають місце при дослідженні кристалізації тугоплавких оксидів, що нагріваються за допомогою лазерного випромінювання [2-3]. Лазери,

як джерело світла, використовуються для вивчення дисперсних біологічних об'єктів, таких як кров людини [4]. Тепловий стан водойм визначається падаючим сонячним потоком, також представляє собою колімуваність випромінювання [5]. А також безліч інших прикладів середовищ, що представляють собою колоїдну систему.

© П. С. Задоржний. 2016

Аналіз літературних даних та постановка проблеми. У роботах [3–5] поле випромінювання розраховувалося за експоненціальним законом Бугера. Більш складна модель поля випромінювання, що складається з колімованої і дифузної частин, розглядалася в роботі [2], але при цьому не враховувалося його розсіювання середовищем. В роботі [1] докладно розглянуто всі механізми взаємодії світлового поля в середині напівпрозорого середовища. В статті описана задача моделювання світлового поля в колоїдних системах, саме засновуючись на даній роботі.

В роботі [6] було проведено розглянуто декілька методів визначення поля випромінювання для характерних умов у водоймах. Дослідження були продовжені в роботі [7], де авторами була поставлена мета розробити метод рішення, який би враховував фізичні особливості переносу випромінювання у водних суспензіях і в той же час мінімізував би обсяг обчислювальних робіт. Запропонований метод трьох потоків показав гарні згоду результати з більш точним методом дискретних ординат і з експериментальними даними. Однак у вищезазначених роботах [6, 7] не враховувалося власне випромінювання середовища.

У даній роботі проводиться аналіз поля випромінювання в шарі напівпрозорої середовища, на межі якої падає колімований і неколімований (дифузний) світловий потік. Дана модель була використана для розрахунку поля випромінювання у водоймі, що формується під дією падаючого сонячного потоку і випромінювання небесного зводу. Для вирішення завдання розглянуто підхід на основі модифікованого методу середніх потоків (СП-метод). Даний метод своїми широкими можливостями для обліку оптичних властивостей середовища і меж поряд з відносною простотою чисельного алгоритму. Використовуючи метод S-перетворення було запропоновано інший алгоритм вирішення завдання.

Розрахунок виконано за допомогою програмного середовища Wolfram Mathematica, оскільки дане середовище дозволяє в повній мірі працювати зі складними математичними моделями та використовує алгоритми, що дозволяють отримати результати швидко та якісно.

Оскільки питання моделювання світлового потоку в напівпрозорих середовищах ще досі досліджено не в повній мірі і методи для розрахунку необхідно уточнювати і вдосконалювати. В даній роботі, опираючись на найбільш вдалому модифікованому методі середніх світлових потоків було запропоновано ще один спосіб вирішення задачі моделювання світлового поля в напівпрозорому середовищі. Метод що розглянутий в даній роботі має ще ряд недоліків та потребує доопрацювання, але навіть на даному етапі дає доволі значні результати і має відносно не складний алгоритм розрахунку.

Ціль та задачі дослідження. Завданням даної роботи було обрати найбільш оптимальну математичну модель для моделювання світлового поля в напівпрозорих середовищах. Було проведено моделювання світлових потоків при проходженні світла через напівпрозоре середовище в системі Mathematica з використанням методу S-перетворення опираючись на метод середніх потоків. Провівши аналіз існуючих рішень

та проведено моделювання проходження світлового поля у вигляді колімованого та дифузного оптичного потоку. Такий вид випромінювання характерний для сонячного випромінювання, а також штучним джерелам світла. Виокремлюючи ту чи іншу складову моделі можна визначити параметри модельованого оптичного поля в різних середовищах та за різних джерел випромінювання. Також ще одним з завдань є шляхом розглянення властивостей різних прозорих середовищ визначити значення терміну «напівпрозоре середовище».

В ході роботи розглянуті прозорі середовища різного агрегатного стану, а також розглянуті колоїдні системи. Спираючись на попередні дослідження [1–7].

Для визначення математичної моделі використано вдосконалений метод середніх світлових потоків, запропонований в роботі [1].

Розглянемо крайову задачу переносу випромінювання в плоскому шарі поглинаючий, випромінюючий і розсіює середовища з заданим розподілом температури $T(x)$. Поле випромінювання складається з двох частин: колімованого (поширюються в межах вузького тілесного кута) і неколімованого (дифузного) випромінювання (рис. 1):

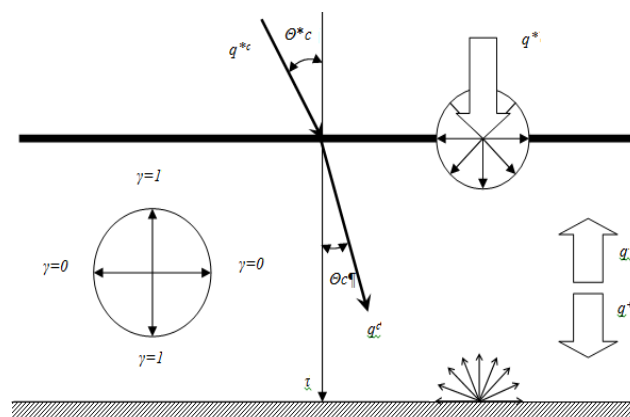


Рис. 1 Фізична схема і система координат

$$I_v^{\Sigma} = I_v^c + I_v \quad (1)$$

Інтенсивність колімованим випромінювання визначається законом Бугера:

$$I_v^c(\tau_v) = I_v^c(0) e^{-\tau_v/\gamma_c} \quad (2)$$

де

$$I_v^c(0) = (1 - \rho(\theta_c^*)) I_v^{*c} \quad (3)$$

I_v^{*c} інтенсивність падаючого на кордон колімованого випромінювання, $\gamma_c = \cos(\theta_c)$, кут падіння θ_c^* і заломлення θ_c колімованого випромінювання пов'язані між собою законом Снелліуса, $\rho(\theta_c^*)$ - коефіцієнт відбиття на границі розділу середовищ, визначається з закону Френеля.

Поле неколімованого випромінювання визначається рівнянням переносу

$$\gamma \frac{\partial I_v(\tau_v, \gamma)}{\partial \tau_v} + I_v(\tau_v, \gamma) =$$

$$= (1 - \omega_v) n_v^2 I_{bv}(T) + \frac{\omega_v}{2} \int_{-1}^1 p_v(\gamma, \gamma') I_v(\tau_v, \gamma') d\gamma' +$$

$$+ \frac{\omega_v}{4\pi} p_v(\gamma, \gamma_c) I_v^c(0) e^{-\tau/\gamma_c}$$

$$0 < \tau_v < \tau_{0v}, -1 \leq \gamma \leq 1 \quad (4)$$

з граничними умовами:

$$\tau_v = 0: I_v^+(\gamma) = \rho_v(\gamma) I_v^-(\gamma) +$$

$$+ \frac{n_v^2}{n_v^{*2}} (1 - \rho_v(\gamma^*)) I_v^*(\gamma^*), \gamma > 0, \quad (5)$$

$$\tau_v = \tau_{0v}: I_v^-(\gamma) = \varepsilon_v n_v^2 I_{bv}(T) +$$

$$+ 2r_v \int_0^1 (I_v^+(\gamma) \gamma + I_v^c(\gamma_c)) d\gamma, \gamma < 0, \quad (6)$$

Тут I_v – спектральна інтенсивність випромінювання, I_v^+ і I_v^- – інтенсивності випромінювання в нижню ($\gamma > 0$) і верхню ($\gamma < 0$) півсферу:

$$\int_{-1}^1 I_v(\tau_v, \gamma) d\gamma = \int_0^1 I_v^+(\tau_v, \gamma) d\gamma + \int_{-1}^0 I_v^-(\tau_v, \gamma) d\gamma, \quad (7)$$

γ – косинус кута між напрямком поширення випромінювання і віссю координат x , $I_{bv}(T)$ – функція Планка випромінювання чорного тіла, $\tau_v = k_v x$ і $\tau_{0v} = k_v \delta$ – спектральна оптична глибина і товщина шару, δ – товщина шару (характерний розмір), $k_v = \alpha_v + \beta_v$ – спектральний коефіцієнт ослаблення, α_v і β_v – спектральні коефіцієнти поглинання і розсіювання, $\omega_v = \beta_v / k_v$ – спектральне альbedo однократно-го розсіювання (число Шустера), n_v – спектральний показник заломлення, ε_v і r_v – спектральна напівсферична дифузна випромінююча і відбивна здатність нижньої межі, пов'язані між собою співвідношенням $\varepsilon_v = 1 - r_v$, p_v – спектральна індикатриса розсіювання, яка постулюється у вигляді [8]:

$$p_v(\gamma_0) = \sum_{l=0}^L a_l P_l(\gamma_0), a_0 = 1 \quad (8)$$

де γ_0 – косинус кута між падаючим $\gamma'(\gamma_c)$ і розсіяним γ -променями, P_l поліном Лежандра порядку l . Еквівалентна система рівнянь СП-методу має вигляд [9]:

$$\frac{d}{d\tau_v} (\Phi_v^+ - \Phi_v^-) + (1 - \omega_v) (m_v^+ \Phi_v^+ - m_v^- \Phi_v^-) = \quad (9)$$

$$= (1 - \omega_v) \Phi_{0v} + \omega_v \Phi_v^c / \gamma_c$$

$$\frac{d}{d\tau_v} (m_v^+ \delta_v^+ \Phi_v^+ - m_v^- \delta_v^- \Phi_v^-) +$$

$$+ (1 - \omega_v \bar{\varepsilon}_v) (\Phi_v^+ - \Phi_v^-) = \omega_v \bar{\varepsilon}_v \Phi_v^c \quad (10)$$

Гранична умова для системи (9) - (10) на поверхні розділу повітря-вода враховує пропускання падаючого потоку і відображення у двох зонах – в області повного внутрішнього відбиття і всередині конуса заломлення [10]:

$$\tau_v = 0: \Phi_v^+ (1 - \bar{\rho}_v) \Phi_v^* + \left(1 - \frac{n_v^{*2}}{n_v^2}\right) \Phi_v^- + \bar{\rho}_v \frac{n_v^{*2}}{n_v^2} \Phi_v^- \quad (11)$$

На нижній межі (дно водойми) враховується власне випромінювання поверхні і дифузне відбиття падаючих потоків колімованим і неколімованим випромінювання:

$$\tau_v = \tau_{0v}: \Phi_v^- = \varepsilon_v \Phi_{0v} / 4 + r_v (\Phi_v^+ + \Phi_v^-) \quad (12)$$

Для спрощення моделі, а також оскільки найбільш важливу роль в цій роботі грає проходження світла безпосередньо через напівпрозоре середовище, надалі не будемо враховувати краєві умови і зосередимося на дослідженні системи рівнянь (9-10). Але деякі складові з цих рівнянь ще не зазначені, тому:

$$\Phi_v^\pm(\tau_v) = \pm \frac{2\pi \int_{0(-1)}^{1(0)} I_v(\tau_v, \gamma) \gamma d\gamma}{4\sigma T_+^4} \quad (13)$$

це безрозмірні щільності напівсферичних потоків. На відміну від методу зазначеного в [1], коефіцієнти $m_v^\pm$ та $\delta_v^\pm$ – визначені як константа для спрощення розрахунку:

$$\bar{\varepsilon}_v = \frac{1}{2} \int_{-1}^1 p(\gamma) \gamma d\gamma \quad (14)$$

це середній косинус кута розсіювання.

$$\Phi_{0v} = \frac{n_v^2 I_{bv}}{4\sigma T_+^4} \quad (15)$$

дана складова характеризує власне випромінювання середовища за рахунок його температури, згідно закону Стефана-Больцмана. В нашій математичній моделі можна не враховувати цей показник, оскільки його значення порівняно з основним потоком буде надзвичайно мале.

Отже в результаті ми маємо систему диференціальних рівнянь (9-10), для того щоб отримати математичну модель проходження світла через напівпрозоре

середовище необхідно вирішити її відносно невідомих напівсферичних щільностей світлового потоку. Метод що представлений в роботі [1] розрахований на моделювання радіаційного теплообміну в середині середовища, але його можна виділити необхідні данні, оскільки основою для розрахунків все ж є світловий потік і модель світлового поля цілком задовольняє умовам поставленої задачі.

На відміну від розглянутої роботи розрахунок в цій роботі проведено іншим методом – вирішення системи диференціальних рівнянь за допомогою операційного методу S-перетворень. Для того щоб розпочати розрахунки необхідно визначити певні вихідні данні, що характеризують середовище поширення світлового поля.

Коефіцієнти $m_v^+ = \pm 2$ та $\delta_v^+ = 1/3$, вибрані такими для того щоб можна було порівняти з роботою [1], на початкових ітераціях. Для розрахунку також було обрані наступні коефіцієнти як вихідні умови: щільність колімованого світлового потоку, що падає на межу поділу середовищ дорівнює 500 Вт/м^2 , неколімованого – 200 Вт/м^2 , альbedo поверхні середовища, згідно зазначеного в роботі [1] $\omega_v = 0.75$, кут під яким падає на межу розділу середовищ випромінювання $\theta = 30^\circ$.

Для того щоб вирішити рівняння диференційної системи згідно S-операторного методу необхідно спочатку про інтегрувати рівняння (9) та (10), тоді ми отримаємо:

$$\Phi_v^+ - \Phi_v^- + (\Phi_0^+ - \Phi_0^-) + (1 - \omega) m^+ \int_0^\tau \Phi_v^+ d\tau -$$

$$-(1 - \omega) m^- \int_0^\tau \Phi_v^- d\tau = \frac{\omega}{\gamma} * \int_0^\tau \Phi_v^c d\tau \quad (16)$$

$$m^+ \delta^+ \Phi_v^+ - m^- \delta^- \Phi_v^- - m^+ \delta^+ \Phi_0^+ + m^- \delta^- \Phi_0^- +$$

$$+ (1 - \omega \bar{\epsilon}) \int_0^\tau \Phi_v^+ d\tau - (1 - \omega \bar{\epsilon}) \int_0^\tau \Phi_v^- d\tau = \omega \bar{\epsilon} * \int_0^\tau \Phi_v^c d\tau \quad (17)$$

замінивши інтеграли на інтегруючі матриці P та перевіривши систему в векторну форму отримаємо:

$$(\bar{E} + a1 * \bar{P}) \bar{\Phi}_v^+ - (\bar{E} + a2 * \bar{P}) \bar{\Phi}_v^- = \bar{N} * \bar{F} * \bar{P} = \Psi_1 \quad (18)$$

$$(b1 + b2 * \bar{P}) \bar{\Phi}_v^+ - (b3 + b4 * \bar{P}) \bar{\Phi}_v^- = \bar{M} * \bar{F} * \bar{P} = \Psi_2 \quad (19)$$

Замінивши всі коефіцієнти на для встановлення загального вигляду отримаємо:

$$\bar{A} \bar{X}_1 - \bar{B} \bar{X}_2 = \bar{\Psi}_1 \quad (20)$$

$$\bar{C} \bar{X}_1 - \bar{D} \bar{X}_2 = \bar{\Psi}_2 \quad (21)$$

Вираз виходить схожим на звичайну алгебраїчну систему рівнянь, але головна відмінність в тому що

данні вирази це вектори. Шляхом вираження одного не відомого через інший отримаємо:

$$\bar{X}_2 = \bar{D}^{-1} * (\bar{\Psi}_2 - \bar{C} \bar{X}_1) \quad (22)$$

$$\bar{A} \bar{X}_1 - \bar{B} (\bar{D}^{-1} * (\bar{\Psi}_2 - \bar{C} \bar{X}_1)) = \bar{\Psi}_1 \quad (23)$$

Після групування у отримаємо фінальну версію:

$$\bar{X}_1 = (\bar{A} - \bar{B} * \bar{D}^{-1} * \bar{C})^{-1} * (\bar{\Psi}_1 - \bar{B} * \bar{D}^{-1} * \bar{\Psi}_2) \quad (24)$$

$$\bar{X}_2 = \bar{D}^{-1} * * (\bar{\Psi}_2 - \bar{C} * (\bar{A} - \bar{B} * \bar{D}^{-1} * \bar{C})^{-1} * (\bar{\Psi}_1 - \bar{B} * \bar{D}^{-1} * \bar{\Psi}_2)) \quad (25)$$

Тоді згідно методу S-перетворення,

$$\bar{\Phi}_v^+ = \bar{X}_1^T * \bar{S}(\tau) \quad (26)$$

$$\bar{\Phi}_v^- = \bar{X}_2^T * \bar{S}(\tau) \quad (27)$$

В результаті ми отримаємо вектор, який і буде являти собою коренями системи.

Згідно наведених вище даних можна змодельовати вирішення методом S-перетворення в програмному середовищі Mathematica. Ось що отримали в результаті моделювання:

```
mp = 2; mn = -2; δ = 1/3; m = 2; ω = 0.75;
θ = 360 / m; T = 1; γc = Cos[30]; ρ = 0.25;
εc0 = 500; εp0 = 200; εn0 = εc0 (1 - ρ);
```

Ввід початкових даних. В якості середовища було обрано мілина близько берега.

У ролі базисної функції виступає степенева функція:

```
s[τ, T, i] := (τ/T)^(i-1);
S = Table[s[τ, T, i], {i, m}];
```

Додаткові данні та визначення які необхідні для моделювання:

```
one[m_] := IdentityMatrix[m];
ξ := 0.30048;
```

Поліном інтегрування:

```
P = Table[∫₀ᵀ S[[i]] * S[[j]] dτ, {i, m}, {j, m}];
P // MatrixForm
```

$$\begin{pmatrix} 1 & \frac{1}{2} \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{3} \end{pmatrix}$$

Векторні функції згідно виведення(16–25):

```

A1 = one[m] + (1 - ω) * mp * P;
B1 = one[m] + (1 - ω) * mn * P;
C1 = one[m] * mp * δ + (1 - ω * ξ) * P;
D1 = one[m] * mn * δ - (1 - ω * ξ) * P;
ϕc1[τ_] := γc * ϕc0 * e-τ/γc;
F1 = ∫0T ϕc1[τ] dτ;
N1 =  $\frac{\omega}{\gamma}$  * F1 - one[m] * (ϕp0 - ϕn0);
M1 = ω * ξ * P * F1 - one[m] * (ϕp0 - ϕn0);

```

Система рівнянь(24), (25) записаних в програмному середовищі:

```

In[18]:= X1 = Inverse[A1 - B1.Inverse[D1].C1].
. (N1 - B1.Inverse[D1].M1);
X2 = Inverse[D1].Inverse[M1 - C1.
.. (A1 * B1 * Inverse[D1].C1)]. (N1 - B1.Inverse[D1].M1);
Рівності (26), (27) записаних в програмному середовищі:

```

```

In[18]:= ϕpa = Inverse[X1].Inverse[P].S;

```

```

In[19]:= ϕna = Inverse[X2].Inverse[P].S;

```

Власне відповіді:

```

In[21]:= ϕpa

```

```

Out[21]:= {0.022322 - 0.0284703 τ, -0.027927 + 0.0602877 τ}

```

```

In[22]:= ϕna

```

```

Out[22]:= {-1.8735 + 1.53976 τ, 1.47687 - 3.96069 τ}

```

Моделювання щільності світлового потоку, в залежності від товщини шару, пройденого світлом:

```

In[31]:= Plot[{ϕpa, ϕna, ϕc1[τ]},
{τ, 0, T}, PlotRange -> Full]

```

Як видно з рис. 1 додаткові складові півсферичних потоків не мають значного впливу на загальний світловий потік, за рахунок того що в нас присутній потужний колімований потік, що в рази перевищує щільність дифузно-розсіяного потоку.

І на кінець сумарний світловий потік рис. 3:

```

In[27]:= Plot[ϕpa + ϕna + ϕc1[τ], {τ, 0, T}]

```

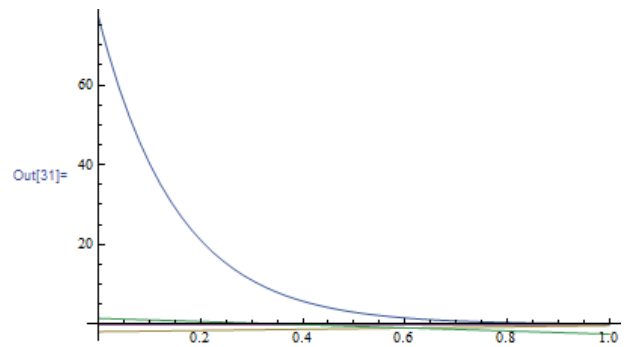


Рис. 2 – Крива щільності окремих складових світлового потоку, в залежності від товщини шару

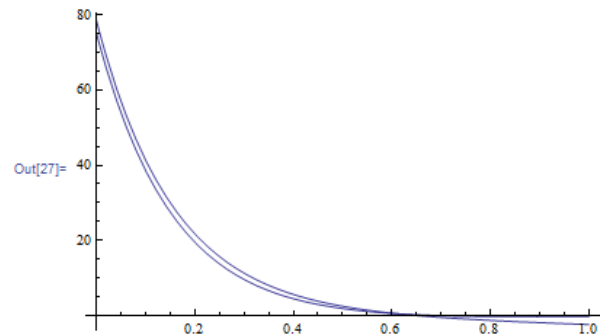


Рис. 3 – Крива загальної щільності світлового потоку, в залежності від товщини шару

Висновки. Як видно з результатів розрахунків, при великій різниці в значеннях колімованого і неколімованого світлових потоків, дифузна складова не має значного впливу на результат. Але за умов коли колімований світловий потік відсутній(сутінки) то дифузна складова є єдиним потоком що потрапляє в середовище.

Тобто математична модель та метод розрахунку дає можливість зрозуміти процеси що відбуваються всередині напівпрозорого середовища, без значних зусиль як в плані алгоритму так і в плані складності розрахунку. Даний метод дозволяє швидко оцінити ситуацію без великих затрат в часі, що робить його зручним в підготовчих роботах перед складним моделюванням або при підготовкою до експерименту.

Список літератури:

1. Тимофеев, А. М. Расчет поля излучения в полупрозрачной среде с учетом падающего коллимированного излучения [Текст] / А. М. Тимофеев // Теплофизика и аэромеханика. – 2012. – Т. 19, № 1. – С. 67–74.
2. Воробьев, А. Ю. Быстрый нагрев и плавление оксида алюминия при воздействии концентрированного лазерного излучения [Текст] / А. Ю. Воробьев, В. А. Петров, В. Е. Тумов // Теплофизика высоких температур. – 2007. – Т. 45, № 4. – С. 533–542.
3. Li J.F., Li L., Stott F.H. Comparison of volumetric and surface heating sources in the modeling of laser melting of ceramic materials [Text] / J. F. Li, L. Li, F.H. Stott // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2004. – Vol. 47. – P. 1159–1174. doi: [10.1016/j.ijheatmasstransfer.2003.10.002](https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2003.10.002)
4. Bukatyj, V. I. Vzaimodejstvie niz-kointensivnogo lazernogo izlucheniya s krov'ju cheloveka [Текст] / V. I. Bukatyj Ja. V. Pavlova S. I. Sakovich O. V. Gas'kova G. G. Ustinov // Izvestija Tomskogo politehnicheskogo universiteta. – 2007. – Т. 310, № 2. – С. 121–125.
5. Snider, D. M. Radiation induced thermal stratification in surface layers of stagnant water [Text] / D. M. Snider, R. Viskanta //

- Journal of Heat Transfer. – 1975. – № 97 (1). – P. 35–40. doi: [10.1115/1.3450284](https://doi.org/10.1115/1.3450284)
6. Daniel, K. J. Prediction of radiation absorption and scattering in turbid water bodies [Text] / K. J. Daniel, N. M. Laurendeau, F. P. Incropera // Journal of Heat Transfer. – 1979. – № 101 (1). – P. 63–67. doi: [10.1115/1.3450937](https://doi.org/10.1115/1.3450937)
 7. Incropera, F. P. A Three-flux method for predicting radiative transfer in aqueous suspensions [Text] / F. P. Incropera W. G. Houf // Journal of Heat Transfer. – 1979. – № 101 (3). – P. 496–501. doi: [10.1115/1.3451016](https://doi.org/10.1115/1.3451016)
 8. Evans, L. B. The Effect of anisotropic scattering on radiant transport [Text] / L. B. Evans, C. M. Chu, S. W. Churchill // Journal of Heat Transfer. – 1965. – Vol. 87, No. 3. – P. 381–387. doi: [10.1115/1.3689120](https://doi.org/10.1115/1.3689120)
 9. Рубцов, Н. А. Комбинированный теплообмен в полупрозрачных средах [Текст] / Н. А. Рубцов, А. М. Тимофеев, Н. А. Саввинова. – Новосибирск: Издательство СО РАН, 2003. – 198 с.
 10. Рубцов, Н. А. О представлении граничных условий в задачах радиационного теплообмена в многослойных системах [Текст] / Н. А. Рубцов, А. М. Тимофеев // Теплофизика и аэромеханика. – 1998. – Т. 5, №. 4. – С. 479–485.
 3. Li, J. F., Li, L., Stott, F. H. (2004). Comparison of volumetric and surface heating sources in the modeling of laser melting of ceramic materials. International Journal of Heat and Mass Transfer, 47(6-7), 1159–1174. doi: [10.1016/j.ijheatmasstransfer.2003.10.002](https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2003.10.002)
 4. Bukatyj, V. I., Pavlova, Ja. V., Sakovich, S. I., Gas'kova, O. V., Ustinov, G. G. (2007). Vzaimodejstvie niz-kointensivnogo lazernogo izlucheniya s krov'ju cheloveka. Izvestiya Tomskogo politehnicheskogo universiteta, 310 (2), 121–125.
 5. Snider, D. M., Viskanta, R. (1975). Radiation Induced Thermal Stratification in Surface Layers of Stagnant Water. Journal of Heat Transfer, 97 (1), 35–40. doi: [10.1115/1.3450284](https://doi.org/10.1115/1.3450284)
 6. Daniel, K. J., Laurendeau, N. M., Incropera, F. P. (1979). Prediction of Radiation Absorption and Scattering in Turbid Water Bodies. Journal of Heat Transfer, 101 (1), 63–67. doi: [10.1115/1.3450937](https://doi.org/10.1115/1.3450937)
 7. Incropera, F. P., Houf, W. G. (1979). A Three-Flux Method for Predicting Radiative Transfer in Aqueous Suspensions. Journal of Heat Transfer, 101 (3), 496–501. doi: [10.1115/1.3451016](https://doi.org/10.1115/1.3451016)
 8. Evans, L. B., Chu, C. M., Churchill, S. W. (1965). The Effect of Anisotropic Scattering on Radiant Transport. Journal of Heat Transfer, 87 (3), 381–387. doi: [10.1115/1.3689120](https://doi.org/10.1115/1.3689120)
 9. Rubcov, N. A., Timofeev, A. M., Cavvinova, N. A. (2003). Kombinirovannyj teploobmen v poluprozrachnyh sredah. Novosibirsk: Izdatel'stvo SO RAN, 198.
 10. Rubcov, N. A., Timofeev, A. M. (1998). O predstavlenii granichnyh uslovij v zadachah radiacionnogo teploobmena v mnogoslojnyh sistemah. Teplofizika i aeromehanika, 5 (4), 479–485.

Bibliography (transliterated):

Поступила (received) 11.11.2016

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Моделирование прохождения света через полупрозрачные среды/ П. С. Задорожний// Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – No 50(1222). – С.36–41. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2079-5459.

Моделирование прохождения света через полупрозрачные среды/ П. С. Задорожний// Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – No 50(1222). – С.36–41. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2079-5459.

Modeling the passage of light through semitransparent media/ P. Zadorozhnyi //Bulletin of NTU “KhPI”. Series: Mechanical-technological systems and complexes. – Kharkov: NTU “KhPI”, 2016. – No 50 (1222). – P.36–41. – Bibliogr.: 10. – ISSN 2079-5459.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Задорожний Павло Сергійович – аспірант, Відділення гібридних моделюючих та керуючих систем в енергетиці Інституту проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова; вул. Генерала Наумова, 15, м. Київ, Україна, 03164; e-mail: pavelzp@gmail.com.

Задорожний Павел Сергеевич – аспірант, Отделение гибридных моделирующих и управляющих систем в энергетике Института проблем моделирования в энергетике им. Г. Е. Пухова; ул. Генерала Наумова, 15, г. Киев, Украина, 03164; e-mail: pavelzp@gmail.com.

Zadorozhnyi Pavel – graduate student, Department of Hybrid Modeling and Control Systems in Power Engineering, Institute of Modeling Problems in Power Engineering named after G. Pukhov; General Naumov str., 15, Kiev, Ukraine., 03164; e-mail: pavelzp@gmail.com.