УДК 681.518.3.

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ВПЛИВУ ПРОНИКНЕННЯ ОПТИЧНОГО ІНФРАЧЕРВОНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ В ПОКРИВ БДЖІЛ

Кунденко М. П., д.т.н.,
Прудка О.А., аспірант*
Харківський національний технічний університет сільського хазяйства імені Петра Василенко
Тел.: +3 8 (066) 083 27 21

Анотація **- розроблено математичну модель проникнення інфрачервоного випромінювання в покрив бджіл. Виведено формули для розрахунку ефективного потоку оптичного випромінювання та поглинутої енергії, що поглинається відповідними прошарками покриву комахи.**

Ключові слова: **бджола, потік, енергія, інфрачервоне випромінювання.**

Постановка проблеми. В наш час термін інфрачервоного випромінювання відомий майже всім, але роботи, які були б зв'язані з вивченням впливу оптичного інфрачервоного випромінювання на живі організми майже не проводяться. Цей напрям в науці вважається майже не дослідженим, незважаючи на те що обмежений вплив інфрачервоного випромінювання може призводити до позитивного впливу на життєдіяльність біологічних об'єктів.

Аналіз останніх досліджень. Більшість бджолиних сімей страждає від захворювання, яке супроводжується загибеллю цілих бджолосімей, що має назву Вароатоз. Це інвазійна хвороба дорослих особин бджолиної сім'ї, їх личинок і лялечок, що викликається кліщем Варроа Якобсон.

Методи боротьби з кліщем підрозділяють на два типи: хімічні та фізичні. Хімічні методи лікування бджолосімей полягають в обробці вуликів, та всієї пасіки хімічними препаратами. Найбільш ефективними є препарати на основі: бромпропілата (препарати фольбекс, акарасана), органічних карбонових кислот (щавлева, мурашина), фенотізіна (препарати фенотіазін, варрофен і ін.).

Фізичні методи полягають в обробці бджіл за допомогою фізичних процесів. До таких методів відносять: термічну обробку, іонізую-

* Науковий керівник - Кунденко М. П., д.т.н., професор

© Кунденко М. П., Прудка О.А.

че випромінювання, інфрачервоне та ультрафіолетове випромінювання, ультразвук, поляризаційне поле, електричний струм, вакуум та ін.

Але такі методи мають свої недоліки. Розглянемо недоліки хімічних методів:

- хімічні препарати від бджоли потрапляють до меду, що не сприяє отриманню екологічно чистої продукції;

- хімічні препарати діють негативно, впливаючи на бджіл та бждолопродукти та ін.

Якщо ж говорити про фізичні методи, то найпоширенішим фізичним методом є термообробка, але вона також має свої недоліки:

- час термообробки (15 - 20 хв.) не витримують бджоли з переповненим кишечником та голодні бджоли;

- при низькій температурі повітря (до 10 °С) треба витримати бджіл у касеті перед термообробкою 10 - 15 хвилин в приміщенні з температурою 15- 18 °С і стільки ж після обробки та ін.

Одним з ефективних способів лікування бджіл є спосіб, який полягає в утворенні обмеженого простору, до якого переміщують бджолосім'ю, перед цим обробивши її високодисперсним матеріалом, наприклад, крохмалем, та опромінюють з усіх сторін електромагнітним випромінюванням [1].

Отже, завдання наступних досліджень полягає в розробці та впровадженні в виробництво установки з методом інфрачервоного опромінення для обробки бджолосімей з метою лікування їх від кліща з найменшими втратами.

Формулювання цілей статті. Розробити математичну модель для розрахунку фізичних характеристик інфрачервоного випромінювання з метою подальшого впровадження їх в виробництво.

Основні матеріали дослідження. В загальному вигляді покрив комахи є складним оптичним неоднорідним середовищем, що в свою чергу, створює складність у створені реальної математичної моделі, яка б точно описувала процеси розподілу енергії оптичного випромінювання у структурах покриву. Тому справедливим є використання покривних рівнянь переносу променистої енергії в середовищі, що розсіює її та розроблене на базисі першого закону термодинаміки Ю. Владіміровим [2] та С. Чандрасекаром [3].

Спектральний потік, який проникає в оптичне середовище позначимо як $F_\lambda(r,n)$, де λ – довжина хвилі, $r = (x, y, z)$ – точка в просторі, в якій реєструється випромінювання, $n = (n_x, n_y, n_z)$ – одиничний вектор проникнення оптичного випромінювання в певному напрямку. Причому має місце вираз: $n_x + n_y + n_z = 1$. Рівняння переносу променистої енергії в середовищі, що розсіює її матиме вигляд

$$n\nabla F_\lambda(r,n)+\alpha_\lambda(r,n)F_\lambda(r,n)=\int_{4\pi}F_\lambda(r,n)\alpha_\lambda^\varepsilon(r,n\to n)dn+f_\lambda(r,n) \qquad (1)$$

Щоб відмітити те, що інтегрування відбувається по одиничній сфері, введено знак 4π під інтегралом. Першим доданком лівої частини є похідна потоку випромінювання в точці r, напрямку n

$$n\cdot\nabla F_\lambda(r,n)=n_x\frac{dF_\lambda}{dx}+n_y\frac{dF_\lambda}{dy}+n_z\frac{dF_\lambda}{dz} \qquad (2)$$

Енергію випромінювання, що поглинається або розсіюється при проходженні елементарного відрізку відстані $(r,r+ndr)$ в напрямку *n*, характеризує другий доданок лівої частини виразу (1). Функція $\alpha_\lambda(r,n)$ є прямою характеристикою просторового коефіцієнту поглинання оптичного потоку та складається із двох частин: $\beta_\lambda(r,n)$ – коефіцієнта поглинання потоку оптичного випромінювання середовищем, $\rho_\lambda(r,n)$ – коефіцієнта розсіяння потоку випромінювання середовищем

$$\alpha_\lambda(r,n)=\beta_\lambda(r,n)+\rho_\lambda(r,n), \qquad (3)$$

де $\alpha_\lambda^\varepsilon(r,n\to n)dn$ – функція, що характеризує енергію розсіювання в елементарному об'ємі структури *r*, що поглинає випромінювання.

Так як ціллю даних досліджень є визначення розподілу енергії в глибину покриву комахи, то подальший розгляд виразу (1) буде вестися тільки відносно вертикальної координати *z(σ)*, де *σ* – товщина покриву

$$n_z\cdot\frac{dF_\lambda(z,n)}{dz}+\alpha_\lambda(z,n)F_\lambda(z,n)=\int_{4\pi}F\lambda(z,n)\alpha_\lambda^\varepsilon(z,n\to n)dn+f_\lambda(z,n), \qquad (4)$$

Досліджуючи особливості будови покриву бджоли варто відмітити, що покрив умовно розділяють на кутикулу, епідерміс та базальну мембрану. Кутикула, в свою чергу, ділиться на кутикулін, екзокутикулу та ендокутикулу. Кожен із прошарків покриву має різноманітний склад клітин. Узагальнення, з точки зору, оптичних характеристик показало, що спільним для них є те, що всі клітини в своєму складі вміщують воду в вільному чи зв'язаному вигляді. Результати цитологічних досліджень доводять, що чим ближче до поверхні покриву знаходяться клітини, тим менше їх біологічне функціонування, тобто клітина має меншу кількість води[4]. Відповідно до зміни кількості води в клітинах вони змінюють свої оптичні властивості, внаслідок чого і відповідні прошарки покриву також змінюють свої властивості.

Із вище викладеного слідує, що взаємодію оптичного випромінювання із покривом комахи можна показати у вигляді спрощеної схеми (рис.1).

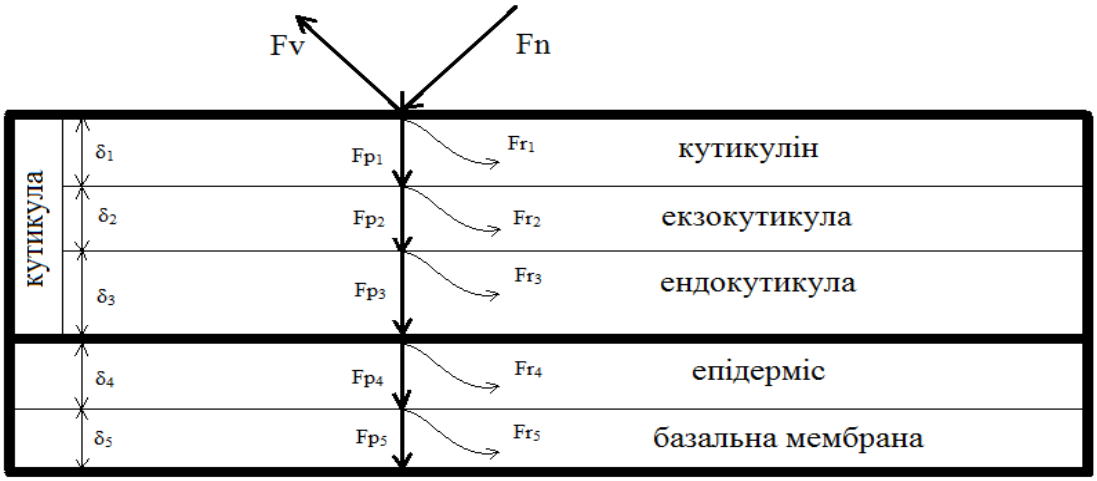

Рис. 1. Розподіл оптичного випромінювання, що потрапляє на поверхню покриву комахи

З аналізу рисунку слідує, що оптичне випромінювання яке потрапляє на поверхню комахи *Fn*, частково відбивається назовні *Fv* та частково проникає в покрив *Fp*. При проходженні оптичного випромінювання в товщину покриву частина випромінювання розсіюється *Fr*, а інша частина поглинається *Fp*. Якщо ж говорити про ефективне використання *Fp* поглинутого потоку випромінювання, то має місце вираз

$$F_p = F^e + F^в, \tag{5}$$

де $F^e = F_{kyt} + F_{ekz} + F_{end} + F_{enid} + F_{baz}$ - потік випромінювання який мав ефективну дію в товщі покриву;

$F^в$ - втрачена частина потоку оптичного випромінювання в товщі покриву.

Виходячи із структури комахи, можна стверджувати, що потік оптичного випромінювання частково поглинається кутикуліном Fp_1, екзокутикулою Fp_2, ендокутикулою Fp_3, епідермісом Fp_4 та базальною мембраною Fp_5.Таким чином, вираз для оптичного потоку випромінювання матиме вигляд

$$F_n = F_v + F_p + F_r, \tag{6}$$

Якщо $F_p = F_{p1} + F_{p2} + F_{p3} + F_{p4} + F_{p5}$, а $F_r = F_{r1} + F_{r2} + F_{r3} + F_{r4} + F_{r5}$ то вираз (6) перетвориться на вираз

$$F_n = F_v + \left(F_{p1} + F_{p2} + F_{p3} + F_{p4} + F_{p5}\right) + \left(F_{r1} + F_{r2} + F_{r3} + F_{r4} + F_{r5}\right), \tag{7}$$

Так як невідомо, яка частина енергії поглинутого випромінювання розсіюється в товщі покривів комахи, а яка поглинається, то введемо коефіцієнт ефективності поглинутого випромінювання (7) k

$$k = \gamma \cdot \beta \,, \tag{8}$$

де γ – енергетичний коефіцієнт поглинання при виконанні корисної роботи в цілому;

β – енергетичний коефіцієнт поглинання при виконанні головної роботи – наприклад, заданої фотохімічної реакції.

Враховуючи сказане вище, ефективний потік оптичного випромінювання поглинутий організмом запишеться у вигляді

$$F^e = k_{kyt}F_{kyt} + k_{ekz}F_{ekz} + k_{end}F_{end} + k_{enid}F_{enid} + k_{baz}F_{baz} \,, \tag{9}$$

де k_{kyt} – коефіцієнт фітобіологічної ефективності поглинання випромінювання кутикуліном;

k_{ekz} – коефіцієнт фітобіологічної ефективності поглинання випромінювання шаром екзокутикули;

k_{end} – коефіцієнт фітобіологічної ефективності поглинання випромінювання шаром ендокутикули;

k_{enid} – коефіцієнт фітобіологічної ефективності поглинання випромінювання шаром епідермісу;

k_{baz} – коефіцієнт фітобіологічної ефективності поглинання випромінювання базальною мембраною.

За законом Бугера-Ламберта-Бера потік оптичного випромінювання, що поглинається шаром кутикуліну, має вигляд

$$F_{kyt} = \left(F_n - F_v\right)\left(1 - e^{-\alpha_1\delta_1}\right) = F_1\left(1 - e^{-\alpha_1\delta_1}\right), \tag{10}$$

де a_1 - показник поглинання випромінювання в товщі кутикуліна;

δ_1 - товщина кутикулінового шару, мм;

$F_1 = F_n - F_v$ – потік оптичного випромінювання, що надходить до шару кутикуліна, Вт.

Потік оптичного випромінювання, який пройшов шар кутикуліну та надходить до екзокутикули, матиме вигляд

$$F_2 = F_1 - F_1\left(1 - e^{-\alpha_1\delta_1}\right) = F_1 e^{-\alpha_1\delta_1}, \tag{11}$$

Аналогічно, до потоку оптичного випромінювання, що поглинається в шарі кутикуліну, запишеться вираз для потоку випромінювання поглинутого в шарі екзокутикули

$$F_{ekz} = F_1 e^{-\alpha_1\delta_1}\left(1 - e^{-\alpha_2\delta_2}\right), \tag{12}$$

Потік випромінювання, що надходить до ендокутикули вираховується аналогічно до F_2

$$F_3 = F_1 e^{-(\alpha_1\delta_1+\alpha_2\delta_2)}, \quad (13)$$

Випромінювання, що поглинається в ендокутикулі

$$F_{end} = F_1 e^{-(\alpha_1\delta_1+\alpha_2\delta_2)}\left(1-e^{-\alpha_3\delta_3}\right), \quad (14)$$

де a_3- показник поглинання оптичного випромінювання ендокутикулою;

δ_3- товщина шару ендокутикули.

Потік випромінювання, що надходить до шару епідермісу

$$F_4 = F_1 e^{-(\alpha_1\delta_1+\alpha_2\delta_2+\alpha_3\delta_3)}, \quad (15)$$

Аналогічно потік, який поглинається в епідермісі

$$F_{enid} = F_1 e^{-(\alpha_1\delta_1+\alpha_2\delta_2+\alpha_3\delta_3)}\left(1-e^{-\alpha_4\delta_4}\right), \quad (16)$$

де a_4 – показник поглинання оптичного випромінювання в шарі епідермісу;

δ_4 - товщина шару епідермісу, мм.

Потік випромінювання, що надходить до базальної мембрани

$$F_5 = F_1 e^{-(\alpha_1\delta_1+\alpha_2\delta_2+\alpha_3\delta_3+\alpha_4\delta_4)}, \quad (17)$$

Тоді поглинутий потік в базальній мембрані матиме вигляд

$$F_{baz} = F_1 e^{-(\alpha_1\delta_1+\alpha_2\delta_2+\alpha_3\delta_3+\alpha_4\delta_4)}\left(1-e^{-\alpha_5\delta_5}\right), \quad (18)$$

де a_5 – показник поглинання оптичного випромінювання в базальній мембрані;

δ_5 – товщина базальної мембрани, мм.

Оптичне випромінювання, що ефективно поглинуте товщею комахи

$$F^e = \left(F_n - F_v\right)\left(k_{kyt}\left(1-e^{-\alpha_1\delta_1}\right) + k_{ekz}e^{-\alpha_1\delta_1}\left(1-e^{-\alpha_2\delta_2}\right) + k_{end}e^{-(\alpha_1\delta_1+\alpha_2\delta_2)}\left(1-e^{-\alpha_3\delta_3}\right) + \right.$$
$$\left. + k_{enid}e^{-(\alpha_1\delta_1+\alpha_2\delta_2+\alpha_3\delta_3)}\left(1-e^{-\alpha_4\delta_4}\right) + k_{baz}e^{-(\alpha_1\delta_1+\alpha_2\delta_2+\alpha_3\delta_3+\alpha_4\delta_4)}\left(1-e^{-\alpha_5\delta_5}\right)\right), \quad (19)$$

де k_i – біологічна активність випромінювання, що була поглинута відповідним шаром товщі комахи;

a_i - показник поглинання i-того шару;

δ_i – товщина i– того шару.

Так як джерела випромінювання мають складний спектр випромінювання, то вони характеризуються розподілом інтенсивності випромінювання $\varphi(\lambda)$ у певному діапазоні хвиль $\lambda_1 \div \lambda_i$, тому показники поглинання структур покриву будуть залежати від довжини хвилі λ, а отже, вираз (19) набуватиме вигляд

$$F^e = \left(F_n(\lambda) - F_v(\lambda)\right)(k_{kyt}(\lambda)\left(1 - e^{-\alpha_1(\lambda)\delta_1}\right) + k_{ekz}(\lambda)e^{-\alpha_1(\lambda)\delta_1}\left(1 - e^{-\alpha_2(\lambda)\delta_2}\right) +$$
$$+k_{end}(\lambda)e^{-(\alpha_1(\lambda)\delta_1+\alpha_2(\lambda)\delta_2)}\left(1 - e^{-\alpha_3(\lambda)\delta_3}\right) + k_{enid}(\lambda)e^{-(\alpha_1(\lambda)\delta_1+\alpha_2(\lambda)\delta_2+\alpha_3(\lambda)\delta_3)}\left(1 - e^{-\alpha_4(\lambda)\delta_4}\right) +, \quad (20)$$
$$+k_{baz}(\lambda)e^{-(\alpha_1(\lambda)\delta_1+\alpha_2(\lambda)\delta_2+\alpha_3(\lambda)\delta_3+\alpha_4(\lambda)\delta_4)}\left(1 - e^{-\alpha_5(\lambda)\delta_5}\right)$$

Енергія фотонів поглинутого випромінювання, що спричиняє біологічну дію при опроміненні комах джерелами із оптичним випромінюванням складного спектрального складу, визначається з виразу:

$$W = \int_0^{\lambda}\int_0^{t} \varphi(\lambda,t)\cdot k(\lambda)\,d\lambda dt, \quad (21)$$

де $\varphi(\lambda,t)$ – спектральна інтенсивність потоку випромінювання від джерела;

$k(\lambda)$ – спектральна біологічна ефективність поглинутого випромінювання;

λ – довжина хвилі випромінювання; t – час опромінення.

З виразу (21) можна визначити енергію випромінювання, яка ефективно поглинається в структурах покриву комахи:

W_1 – енергія, що поглинута в прошарку кутикуліну товщиною δ_1

$$W_1 = \int_0^{\lambda}\int_0^{t} \varphi(\lambda,t)\left(1-\rho(\lambda)\right)\left(1 - e^{-\alpha_1(\lambda)\delta_1}\right)k_{kyt}(\lambda)\,d\lambda dt, \quad (22)$$

W_2 – енергія випромінювання, що поглинута в екзокутикулі

$$W_2 = \int_0^{\lambda}\int_0^{t} \varphi(\lambda,t)\left(1-\rho(\lambda)\right)e^{-\alpha_1(\lambda)\delta_1}\left(1 - e^{-\alpha_2(\lambda)\delta_2}\right)k_{ekz}(\lambda)\,d\lambda dt, \quad (23)$$

W_3 – енергія випромінювання, що поглинута в ендокутикулі

$$W_3 = \int_0^{\lambda}\int_0^{t} \varphi(\lambda,t)\left(1-\rho(\lambda)\right)k_{end}(\lambda)e^{-(\alpha_1(\lambda)\delta_1+\alpha_2(\lambda)\delta_2)}\left(1 - e^{-\alpha_3(\lambda)\delta_3}\right)d\lambda dt, \quad (24)$$

W_4 - енергія випромінювання, що поглинута шаром епідермісу

$$W_4 = \int_0^{\lambda}\int_0^{t} \varphi(\lambda,t)\left(1-\rho(\lambda)\right)e^{-(\alpha_1(\lambda)\delta_1+\alpha_2(\lambda)\delta_2+\alpha_3(\lambda)\delta_3)}\left(1 - e^{-\alpha_4(\lambda)\delta_4}\right)k_{enid}(\lambda)\,d\lambda dt, \quad (25)$$

W_5 – енергія випромінювання поглинута в базальній мембрані

$$W_5 = \int_0^{\lambda}\int_0^{t} \varphi(\lambda,t)\left(1-\rho(\lambda)\right)e^{-(\alpha_1(\lambda)\delta_1+\alpha_2(\lambda)\delta_2+\alpha_3(\lambda)\delta_3+\alpha_4(\lambda)\delta_4)}\left(1 - e^{-\alpha_5(\lambda)\delta_5}\right)k_{baz}(\lambda)\,d\lambda dt, \quad (26)$$

З попередніх виразів для $W_1 \div W_5$ з'являється можливість визначити кількісну характеристику енергії оптичного випромінювання, яка поглинається покривом комахи та приймає участь у фотобіологічній реакції з ефективністю $k_i(\lambda)$.

Данні вирази були отримані, враховуючи такі положення:

- фотони оптичного випромінювання, що сприймаються молекулярними структурами, розділяються рівномірно в товщі δ кожного прошарку поверхні;
- показники поглинання α залежать лише від довжини хвилі оптичного випромінювання.

В нашому випадку показник поглинання α є не тільки функцією для довжини хвилі, а й для просторового розподілу або концентрації сприймаючих молекулярних структур в товщі і об'ємі кожного прошарку покриву. Враховуючи це, математичний вираз енергії поглинутого випромінювання і перетвореного прошарком покриву комахи (з ефективністю перетворення) $k_i(\lambda)$, матиме вигляд:

- енергія поглинутого оптичного випромінювання в кутикуліні

$$W_1 = \iiint \varphi(\lambda,t)\left(1-\rho(\lambda)\right)\left(1-e^{-\alpha_1(\lambda,\delta_1)\delta_1}\right)k_{kyt}(\lambda)\,d\lambda dt d\delta\,, \qquad (27)$$

- енергія поглинутого оптичного випромінювання в екзокутикулі

$$W_2 = \iiint \varphi(\lambda,t)\left(1-\rho(\lambda)\right)e^{-\alpha_1(\lambda,\delta_1)\delta_1}\left(1-e^{-\alpha_2(\lambda,\delta_2)\delta_2}\right)k_{ekz}(\lambda)\,d\lambda dt d\delta\,, \qquad (28)$$

- енергія поглинутого оптичного випромінювання в ендокутикулі

$$W_3 = \iiint \varphi(\lambda,t)\left(1-\rho(\lambda)\right)e^{-\left(\alpha_1(\lambda,\delta_1)\delta_1+\alpha_2(\lambda,\delta_2)\delta_2\right)}\left(1-e^{-\alpha_3(\lambda,\delta_3)\delta_3}\right)k_{end}(\lambda)\,d\lambda dt d\delta\,, \qquad (29)$$

- енергія поглинутого оптичного випромінювання в епідермісі

$$W_4 = \iiint \varphi(\lambda,t)\left(1-\rho(\lambda)\right)e^{-\left(\alpha_1(\lambda,\delta_1)\delta_1+\alpha_2(\lambda,\delta_2)\delta_2+\alpha_3(\lambda,\delta_3)\delta_3\right)}(1-e^{-\alpha_4(\lambda,\delta_4)\delta_4})k_{enid}(\lambda)\,d\lambda dt d\delta \qquad (30)$$

- енергія поглинутого оптичного випромінювання в базальній мембрані

$$W_5 = \iiint \varphi(\lambda,t)\left(1-\rho(\lambda)\right)e^{-\left(\alpha_1(\lambda,\delta_1)\delta_1+\alpha_2(\lambda,\delta_2)\delta_2+\alpha_3(\lambda,\delta_3)\delta_3+\alpha_4(\lambda,\delta_4)\delta_4\right)}\times$$
$$\times\left(1-e^{-\alpha_5(\lambda,\delta_5)\delta_5}\right)k_{baz}(\lambda)\,d\lambda dt d\delta\,, \qquad (31)$$

Звідси, загальна енергія ефективно поглинута покривом комахи матиме вигляд

$$
\begin{aligned}
W_p &= W_1 + W_2 + W_3 + W_4 + W_5 = \iiint \Big[\varphi(\lambda,t)\big(1-\rho(\lambda)\big) \times \\
&\times \Big(1 - e^{-\alpha_1(\lambda,\delta_1)\delta_1}\Big) k_{kyt}(\lambda) + \varphi(\lambda,t)\big(1-\rho(\lambda)\big) e^{-\alpha_1(\lambda,\delta_1)\delta_1} \times \\
&\times \Big(1 - e^{-\alpha_2(\lambda,\delta_2)\delta_2}\Big) k_{ekz}(\lambda) + \varphi(\lambda,t)\big(1-\rho(\lambda)\big) e^{-(\alpha_1(\lambda,\delta_1)\delta_1 + \alpha_2(\lambda,\delta_2)\delta_2)} \times \\
&\times \Big(1 - e^{-\alpha_3(\lambda,\delta_3)\delta_3}\Big) k_{end}(\lambda) + \varphi(\lambda,t)\big(1-\rho(\lambda)\big) e^{-(\alpha_1(\lambda,\delta_1)\delta_1 + \alpha_2(\lambda,\delta_2)\delta_2 + \alpha_3(\lambda,\delta_3)\delta_3)} \times \\
&\times \Big(1 - e^{-\alpha_4(\lambda,\delta_4)\delta_4}\Big) k_{enid}(\lambda) + \varphi(\lambda,t)\big(1-\rho(\lambda)\big) e^{-(\alpha_1(\lambda,\delta_1)\delta_1 + \alpha_2(\lambda,\delta_2)\delta_2 + \alpha_3(\lambda,\delta_3)\delta_3 + \alpha_4(\lambda,\delta_4)\delta_4)} \times \\
&\times \Big(1 - e^{-\alpha_5(\lambda,\delta_5)\delta_5}\Big) k_{baz}(\lambda) \Big] d\lambda dt d\delta
\end{aligned}
\tag{32}
$$

За допомогою математичних операцій енергія, що ефективно поглинається в товщі покриву, запишеться у вигляді

$$
\begin{aligned}
W_p &= \iiint \varphi(\lambda,t)\big(1-\rho(\lambda)\big)\Big(\Big(1 - e^{-\alpha_1(\lambda,\delta_1)\delta_1}\Big) k_{kyt}(\lambda) + e^{-\alpha_1(\lambda,\delta_1)\delta_1}\Big(1 - e^{-\alpha_2(\lambda,\delta_2)\delta_2}\Big) k_{ekz}(\lambda) + \\
&+ e^{-(\alpha_1(\lambda,\delta_1)\delta_1 + \alpha_2(\lambda,\delta_2)\delta_2)}\Big(1 - e^{-\alpha_3(\lambda,\delta_3)\delta_3}\Big) k_{end}(\lambda) + \\
&+ e^{-(\alpha_1(\lambda,\delta_1)\delta_1 + \alpha_2(\lambda,\delta_2)\delta_2 + \alpha_3(\lambda,\delta_3)\delta_3)}\Big(1 - e^{-\alpha_4(\lambda,\delta_4)\delta_4}\Big) k_{enid}(\lambda) + \\
&+ e^{-(\alpha_1(\lambda,\delta_1)\delta_1 + \alpha_2(\lambda,\delta_2)\delta_2 + \alpha_3(\lambda,\delta_3)\delta_3 + \alpha_4(\lambda,\delta_4)\delta_4)}\Big(1 - e^{-\alpha_5(\lambda,\delta_5)\delta_5}\Big) k_{baz}(\lambda)\Big) d\lambda dt d\delta
\end{aligned}
\tag{33}
$$

де W_p – енергія оптичного випромінювання, ефективно поглинута всім шкірним покривом комахи за час опромінення t;

$k_i(\lambda)$ –відносна спектральна ефективність в певному шарі покриву з довжиною хвилі λ;

$\varphi(\lambda,t)$ – функція спектральної інтенсивності потоку джерела оптичного випромінювання в процесі опромінення;

$\rho(\lambda)$ – коефіцієнт відбиття оптичного випромінювання поверхнею тіла комахи з довжиною хвилі λ;

δ_1, δ_2, δ_3, δ_4, δ_5 – товщини прошарків поверхні відповідно: кутикуліну, екзокутикули, ендокутикули, епідермісу та базальної мембрани;

$\alpha_1(\lambda,\delta_1), \alpha_2(\lambda,\delta_2), \alpha_3(\lambda,\delta_3), \alpha_4(\lambda,\delta_4), \alpha_5(\lambda,\delta_5)$ – спектральні показники поглинання оптичного випромінювання з довжиною хвилі λ по товщі прошарку відповідно: кутикуліну, екзокутикули, ендокутикули, епідермісу та базальної мембрани.

Аналізуючи отриманий вираз (33) маємо, що $\left(1 - e^{-\alpha_i(\lambda,\delta_i)\delta_i}\right)$ – характеризує енергію оптичного випромінювання, що поглинається в шарі товщиною δ_i, а вираз $e^{-\alpha_i(\lambda,\delta_i)\delta_i}$ характеризує енергію, що проходить через певний шар покриву.

В даних розрахунках важливо врахувати те, що епідерміс складається з нашарувань пласких зневоднених клітин, які втратили можливість біологічного функціонування («життєдіяльності»). Таким чином, епідерміс є прошарком із мертвих клітин і тому говорити про біологічну активність поглинутого в ньому випромінювання не правильно. Реальним є визначення поглинутого в епідермісі випромінювання, як розсіяного (втраченого). З вище сказаного маємо, що вираз $\left(1-e^{-\alpha_4(\lambda,\delta_4)\delta_4}\right)=0$.

Отже, вираз для ефективно поглинутої енергії оптичного випромінювання матиме вигляд

$$W_p=\iiint \varphi(\lambda,t)(1-\rho(\lambda))(\left(1-e^{-\alpha_1(\lambda,\delta_1)\delta_1}\right)k_{kyt}(\lambda)+e^{-\alpha_1(\lambda,\delta_1)\delta_1}\left(1-e^{-\alpha_2(\lambda,\delta_2)\delta_2}\right)k_{ekz}(\lambda)+$$
$$+e^{-(\alpha_1(\lambda,\delta_1)\delta_1+\alpha_2(\lambda,\delta_2)\delta_2)}(1-e^{-\alpha_3(\lambda,\delta_3)\delta_3})k_{end}(\lambda)+e^{-(\alpha_1(\lambda,\delta_1)\delta_1+\alpha_2(\lambda,\delta_2)\delta_2+\alpha_3(\lambda,\delta_3)\delta_3+\alpha_4(\lambda,\delta_4)\delta_4)}\times \quad ,(34)$$
$$\times(1-e^{-\alpha_5(\lambda,\delta_5)\delta_5})k_{baz}(\lambda))d\lambda dtd\delta$$

В отриманому виразі також необхідно врахувати, що базальна мембрана являє собою тонкий безклітковий шар, який є опорою для клітин епідермісу, тому біологічна активність поглинутого в ній випромінювання наближається до нуля. Враховуючи цей факт, енергія поглинутого оптичного випромінювання запишеться у вигляді

$$W_p=\iiint \varphi(\lambda,t)(1-\rho(\lambda))(\left(1-e^{-\alpha_1(\lambda,\delta_1)\delta_1}\right)k_{kyt}(\lambda)+e^{-\alpha_1(\lambda,\delta_1)\delta_1}\left(1-e^{-\alpha_2(\lambda,\delta_2)\delta_2}\right)k_{ekz}(\lambda)+$$
$$+e^{-(\alpha_1(\lambda,\delta_1)\delta_1+\alpha_2(\lambda,\delta_2)\delta_2)}\left(1-e^{-\alpha_3(\lambda,\delta_3)\delta_3}\right)k_{end}(\lambda))d\lambda dtd\delta \quad (35)$$

Аналізуючи отриманий вираз для W_p, з точки зору, визначення кількості затраченої енергії оптичного випромінювання на біологічну дію в організмі комахи, потрібно знати спектральні показники поглинання випромінювання в поглинаючих структурах покриву $\alpha_i(\lambda,\delta_i)$ і відповідні коефіцієнти біологічної ефективності поглинутого випромінювання $k_i(\lambda)$. Кількісні значення цих величин сучасній науці не відомі, тому введемо деякі припущення.

Випромінювання, що було поглинуте шаром кутикуліну, екзокутикулою та ендокутикулою тобто всією кутикулою, спричиняє кількісно і якісно однакову біологічну дію, тобто $k_{kyt}(\lambda)=k_{ekz}(\lambda)=k_{end}(\lambda)=k(\lambda)$. Тоді

$$W_p=\iiint \varphi(\lambda,t)(1-\rho(\lambda))k(\lambda)(1-e^{-(\alpha_1(\lambda,\delta_1)\delta_1+\alpha_2(\lambda,\delta_2)\delta_2+\alpha_3(\lambda,\delta_3)\delta_3)})d\lambda dtd\delta, \quad (36)$$

де $\alpha_i(\lambda,\delta_i)$ – показники поглинання оптичного випромінювання в структурах покриву однакові, тоді

$$W_p=\iiint \varphi(\lambda,t)(1-\rho(\lambda))k(\lambda)(1-e^{-(\alpha(\lambda,\delta_1)\delta_1+\alpha(\lambda,\delta_2)\delta_2+\alpha(\lambda,\delta_3)\delta_3)})d\lambda dtd\delta, \quad (37)$$

З огляду на закони фотобіології введемо позначення для виразу $e^{-\alpha_i(\lambda,\delta_i)\delta_i}$ через $\tau(\lambda,\delta_i)$ – експоненціальний коефіцієнт пропускання, а $1-e^{-\alpha_i(\lambda,\delta_i)\delta_i}$ через коефіцієнт поглинання $\varepsilon(\lambda,\delta_i)$, тоді отримаємо

$$W_p = \iiint \varphi(\lambda,t)(1-\rho(\lambda))k(\lambda)\varepsilon(\lambda,\delta_{1,2,3})d\lambda dt d\delta\,, \qquad (38)$$

або

$$W_p = \iiint \varphi(\lambda,t)(1-\rho(\lambda))k(\lambda)(1-\tau(\lambda,\delta_{1,2,3}))d\lambda dt d\delta\,, \qquad (39)$$

Висновок. З отриманих виразів видно, що енергія, затрачена на утворення продукту конкретної фітобіологічної реакції в товщі покриву комахи, залежить від спектрального складу джерела $\varphi(\lambda,t)$ в період опромінення, ефективності фітобіологічної реакції $k(\lambda)$, спектрального коефіцієнта відбиття $p(\lambda)$ поверхневого покриву комахи, а також спектральних коефіцієнтів поглинання $\varepsilon(\lambda,\delta_i)$ та пропускання $\tau(\lambda,\delta_i)$ відповідних шарів покриву.

Враховуючи властивості фотонів на різних ділянках спектру оптичного випромінювання при визначенні енергії дії інфрачервоного випромінювання варто користуватися виразом (39), це пов'язане з тим, що фотони інфрачервоного випромінювання мають невелику енергію та проникають глибоко в структури, які знаходяться під покривом. А для визначення енергії дії ультрафіолетового випромінювання слід використовувати вираз (38).

Так як в даній роботі вивчається вплив оптичного випромінювання саме інфрачервоного спектру, то проаналізуємо формулу (39). Спектральна щільність потоку випромінювання $\varphi(\lambda,t)$ є характеристикою певного джерела оптичного випромінювання, а отже є відомою; спектральний коефіцієнт відбивання хітинового покриву комахи $p(\lambda)$ легко визначається у виробничих умовах фотометром; $k(\lambda)$ – коефіцієнт ефективності фотобіологічної реакції визначається спектром конкретної фітобіологічної дії і потребує більш глибокого вивчення. Проблемою на даному етапі є визначення спектрального коефіцієнту пропускання $\tau(\lambda,\delta_i)$ прошарків покриву.

Список використаних джерел.

1. Патент України № 59767 Спосіб боротьби з вароатозом бджіл/ *М. А. Романченко, О. С. Нікітіна, С.П. Нікітін [і др.]*. Заявник та патентовласник *М.А. Романченко* - № u 2010 14346 заявл. 30.11.2010; опубл. 25.05.2011, Бюл. №10

2. *Владимиров Ю.А.* Первичные физико-химические стадии действия УФ излучения на белки.- В кн.: Ультрафиолетовое излучение.- М.: Медицина, 1996. - Сб. 4, - С. 5-13.

3. *Червынский Л.С., Лавриненко Ю.Н., Моисеев М.М., Андреев М.П.*// Установка для ультрафіолетового облучения / А.С. 16833596 СССР. Бюл.38, 1991

4. *Калабухова Т.Н.* Изучение механизма УФ-инактивации ферментов. / *Т.Н. Калабухова, Н.В. Кондакова, Л.Х. Эйдус* // Биологическое действие ультрафиолетового излучения/. – М.: Наука, 1975. -С. 15-20

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ВЛИЯНИЯ ПРОНИКНОВЕНИЯ ОПТИЧЕСКОГО ИНФРАКРАСНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ПОКРОВ ПЧЕЛ

Кунденко Н.П., Прудка О.А.

Аннотация **- Разработана математическая модель проникновения инфракрасного излучения в покров пчел. Выведены формулы для расчета эффективного потока оптического излучения и поглощенной энергии, которая поглощается соответствующими слоями покрова пчелы.**

MATHEMATICAL MODEL OF INFLUENCE PENETRATION OF THE OPTICAL INFRARED RADIATION INTO COVERS OF BEES

N. Kundenko, O. Prudka

Summary

The mathematical model penetration of an infrared radiation into a cover of bees is developed. Formulas for calculation of an efficient stream of optical radiation and the absorbed energy which is absorbed by the corresponding spheres of a cover of a bee were obtained.