

СПОСІБ КОНТРОЛЮВАННЯ НАПОВНЕНOSTІ РЕЗЕРВУАРА ІНГАЛЯТОРА

Мирослав Тихан, д.т.н., проф., Олексій Дідковський, аспірант

Національний університет «Львівська політехніка», Україна

e-mail: myroslav.o.tykhany@lpnu.ua, oleksii.d.didkovskiy@lpnu.ua

Анотація

У статті запропоновано спосіб оптичного контролю наповненості резервуара інгалятора, що базується на явищі повного внутрішнього відбивання у світловоді. Розроблено конструкцію детектора, який дозволяє визначати наявність робочої рідини (гліцерин, пропіленгліколь або їх суміш) у різних положеннях інгалятора. Проведено теоретичний аналіз граничних умов експлуатації, розраховано втрати світла у світловоді залежно від матеріалу та середовища, у якому перебуває світловод, а також розроблено метод визначення критично малого рівня робочої рідини у резервуарі інгалятора. Експериментально підтверджено працездатність способу. Запропонований спосіб може бути використаний у біомедичних пристроях для підвищення безпеки та комфорту інгаляційної терапії.

Ключові слова

Інгалятор, контроль наповнення рідиною, оптичний сенсор, світловод, детектор рідини

1. Вступ

На сьогодні у лікуванні дихальних шляхів для доставлення діючих речовин до слизових оболонок, широкого розповсюдження набули інгалятори (небулайзери) різного типу: ультразвукові, компресорні, випаровувальні, та інші.

У випаровувальних інгаляторах робоча рідина з розчиненими у ній діючими речовинами перебуває у спеціальному резервуарі. У нижній частині резервуара міститься порожнина з нагрівальним елементом. Ця порожнина заповнена пористим матеріалом – гнітом. Основним матеріалом для гноту є органічна бавовна. Вона добре вбирає рідину і забезпечує рівномірну подачу до нагрівального елемента. Також можуть використовуватися інші матеріали, такі як бамбук або целюлоза, але вони не так поширені, як бавовна. Під час роботи інгалятора, робоча рідина потрапляє у випаровувальну камеру та просочує гніт, нагрівальний елемент випаровує рідину, пари якої покидають інгалятор через центральний канал у резервуарі.

Для інгаляторів з механічним способом утворення аерозолі (компресорні, ультразвукові) проблема визначення наповненості резервуара для інгаляційної рідини, не є критичною, адже відсутність рідини, як правило, сама є сигналом до завершення сеансу. На відміну від механічних, у нагрівальних інгаляторах вичерпання рідини може призвести до перегріву гноту, і, як наслідок, потрапляння у дихальні шляхи небезпечних або неприємних продуктів перегріву. Тому визначення наявності рідини є важливою складовою функціоналу таких пристроїв.

Існує багато способів контролю рівня рідини у ємності: механічний (поплавкові сенсори) [6], ємнісний [7], ультразвуковий [8], резистивний [9], гідростатичний (на основі тиску), оптичний та інші [10]. Умови експлуатації інгалятора, такі як мобільність та перепад температур, накладають обмеження на вибір способу. Окрім того, існує проблема мініатюризації.

Стаття присвячена розробленню оптичного способу контролювання наповненості робочою рідиною резервуара інгалятора.

2. Постановка задачі.

Випаровувальний інгалятор є компактним переносним пристроєм. (Рис. 1). Оскільки забезпечити мобільний пристрій від механічних перевантажень та гарантувати фіксоване положення неможливо, спосіб повинен бути нечутливим до цих факторів, а також, у зв'язку з використанням полімерних матеріалів для корпусу інгалятора та резервуара, - електромагнітного впливу.

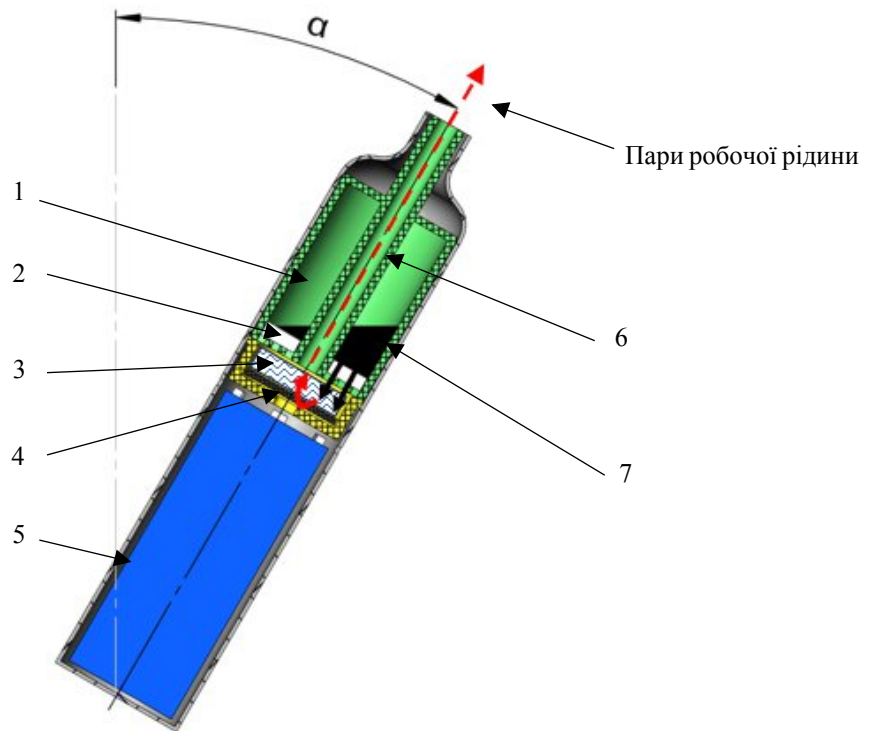


Рис. 1. Схема інгалятора

1 – резервуар, 2 – детектор рідини, 3 – гніт, 4 – нагрівальний елемент, 5 – електричний акумулятор, 6 – паровивідний канал, 7 – робоча рідина.

При інгаляції інгалятор може перебувати під кутом α від 0 до 90 градусів (Рис.1). Ці умови є засадничими для визначення граничних умов експлуатації в подальшому.

Отже, для безпечного використання інгалятора необхідно мати постійний контроль наповненості резервуара і автоматично відключати нагрівальний елемент інгалятора при зменшенні кількості рідини до критичного рівня. Спосіб визначення наявності рідини у резервуарі повинен забезпечувати вимірювання у діапазоні робочих положень пристрою за умови малої кількості рідини.

3. Спосіб контролювання наповненості резервуара інгалятора.

До оптичних способів контролю рівня рідини відносять ті, у яких під час вимірювань промінь світла змінює напрям, інтенсивність або інші свої параметри. Розрізняють рефлексивні та оптоволоконні способи. Рефлексивні працюють за принципом оптичного далекоміра [5] і є непридатними для вирішення поставленої задачі, оскільки дзеркало рідини може перебувати під різними кутами до осі резервуара під час експлуатації, що не дозволяє визначити її рівень. Оптоволоконні способи контролю поділяються на ті, що мають безперервний або дискретний вихідний сигнал (залишаючись аналоговими). Дискретні можуть бути реалізовані за допомогою насічок на оптоволокну [11], або повітряних проміжків у серцевині оптоволокну [12], що занурене у рідину. Фактично, цей спосіб є прямим аналогом лінійки, яку помістили у резервуар, де насічки або повітряні проміжки виконують роль поділок лінійки. Ці способи також непридатні для вирішення поставленої задачі через обмеження, що описані вище. Оптоволоконні способи з безперервним вихідним сигналом можуть ґрунтуватися на інтерференції у багатомодовому волокну [13], де ефект інтерференції призводить до зміни вихідного сигналу залежно від довжини зануреної у рідину ділянки оптоволокну, та на порушенні повного внутрішнього відбивання світла на поверхні оптоволокну без оболонки при контакті з рідиною. Спосіб, що базується на порушенні повного внутрішнього відбивання, реалізується через переплетення двох багатомодових оптичних волокон, одне з яких несе енергетичний сигнал (у нього подається світло), а друге – інформаційний. Інформаційний сигнал утворюється внаслідок взаємного проникання світла між волокнами, що відбувається тільки на зануреній у рідину ділянці цієї пари волокон через розсіювання світла назовні при контакті з рідиною [14]. Також він може реалізовуватися через надавання оболонці одномодового оптоволокну D-подібної форми, що призводить до локальних втрат світла на зануреній ділянці і ослаблення вихідного сигналу [15]. Іншою реалізацією способу, що спирається на порушення повного внутрішнього відбивання у світловоді, є оптична призма, що змінює напрям променів світла у сухому стані, та перестає працювати при змочуванні [5]. Сенсори, побудовані на основі цього способу, використовуються для визначення максимального або мінімального рівня рідини у статичних, а не мобільних ємностях, якою є резервуар інгалятора.

З урахуванням експлуатаційних вимог, розроблено комбінований оптичний спосіб, у якому чутливим елементом є світловод, але принцип роботи аналогічний до використання призми. Для реалізації способу пропонується оптичний детектор, ескізна конструкція якого подана на рис. 2.

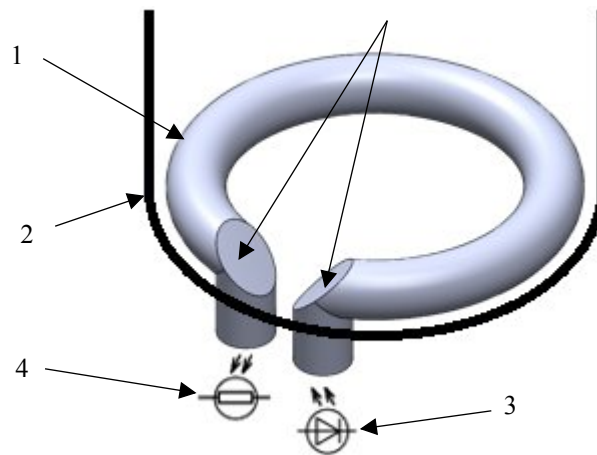


Рис. 2. Конструкція детектора

1 – світловод, 2 – резервуар, 3 – джерело світла (світлодіод), 4 – фотоприймач, 5 – світловідбивальні фаски.

В основі способу лежить явище повного внутрішнього відбивання світла у світловоді та його порушення при контакті світловода з робочою рідиною. До поки резервуар наповнений і світловод занурений у рідину, світло розсіюється на вигині тороїдального світловода і не доходить до приймача. За відсутності рідини світлові промені проходять через світловод, тому приймач отримує певний сигнал, що є інформацією про спорожнення резервуара.

В якості робочої рідини у інгаляторі використовуються гліцерин, пропіленгліколь, або їхня суміш. Фізичні властивості цих рідин в нормальних умовах подано у Таблиці 1[1].

Табл. 1. Фізичні властивості інгаляторних рідин.

Робочі рідини	Густина, г/см ³	Показник заломлення, n ^D
Гліцерин	1.261	1.4735
Пропіленгліколь	1.036	1.4323

Розповсюдженими матеріалами для світловодів є полікарбонат та плексиглас. Їхні оптичні та механічні характеристики подані у Таблиці 2.

Табл. 2. Оптичні та механічні характеристики матеріалів світловода.

Матеріал світловода	Показник заломлення, n ^D	*Критичний кут, n ₂ -повітря, $\Theta_{кр}^n$, (°)	*Критичний кут, n ₂ -гліцерин, $\Theta_{кр}^{гл}$, (°)	*Критичний кут, n ₂ -пропіленгліколь, $\Theta_{кр}^{пг}$, (°)	**Кут змочування, гліцерин, $\Theta_{зл}^3$, (°)	**Кут змочування, пропіленгліколь, $\Theta_{зл}^{пг}$, (°)
Полікарбонат (PC)	1.59	39.0	67.9	64.3	59.0	59.0
Поліметилметакрилат (плексиглас) (PMMA)	1.49	42.2	81.5	74.0	63.8	63.3

* Критичні кути $\Theta_{кр}^n$, $\Theta_{кр}^{гл}$ та $\Theta_{кр}^{пг}$ розраховано за законом Снеліуса.

** Кути змочування для пар матеріалів розраховано за законом Юнга [3].

Зауважимо, що на світловоді не повинно лишатися крапель після закінчення рідини у резервуарі, оскільки залишки рідини можуть утворити плівку на поверхні світловода та сприяти розсіюванню світла, що призведе до хибного сигналу про наповнення резервуара. З Таблиці 2 видно, що матеріали світловода мають помірні олеофільні властивості, адже кут змочування для них лежить у межах 0-90°. З одного боку, такі значення свідчать про характер змочуваності, з іншого боку, чим більший кут змочування, тим менша робота адгезії – здатність крапель утримуватися на поверхні [4]. Крім цього, поверхня світловода є опуклою, а рівень рідини зменшується поступово, що не сприятиме утворенню крапель. Отже, беручи до уваги ці міркування, утворення плівки або крапель на поверхні світловода не передбачається.

4. Граничні умови при експлуатації.

У залежності від ступеня наповненості резервуара та робочого положення інгальатора можна виділити такі граничні умови при його експлуатації:

4.1 Резервуар повний, положення інгальатора вертикальне ($\alpha = 0^\circ$, Рис. 3)

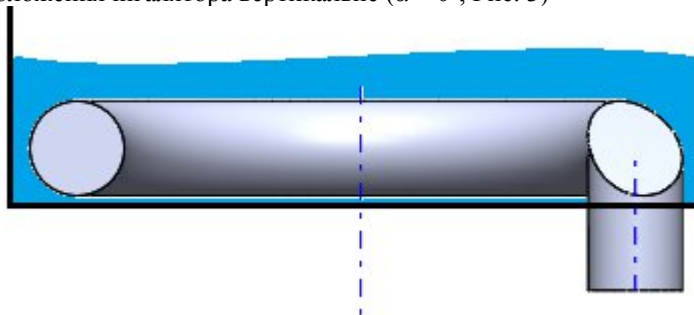


Рис. 3. Заповнений резервуар.

Якщо є повне або значне занурення детектора у робочу рідину, то світлові промені не зазнають повного внутрішнього відбивання у світловоді та розсіюються, тому на виході світловода сигнал буде мінімальний.

4.2 Резервуар порожній, положення інгальатора вертикальне ($\alpha = 0^\circ$, Рис. 4)

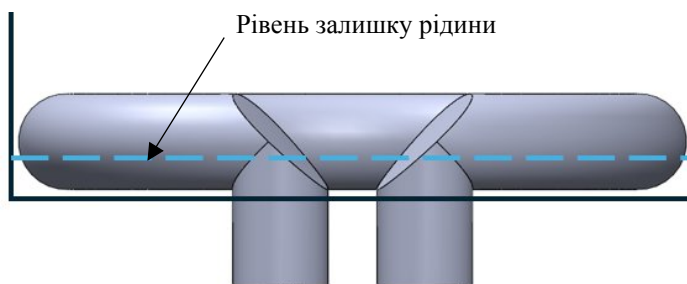


Рис. 4. Спорознілий резервуар, вертикальне положення інгальатора.

Оскільки резервуар інгальатора є циліндром значної висоти відносно діаметра (Рис.1), критичний об'єм залишкової рідини на межі чутливості детектора є більшим при горизонтальному розташуванні інгальатора ($\alpha=90^\circ$, Рис.1). Це пов'язано з тим, що у горизонтальному положенні площа світловода зануреного у рідину є меншою. Тобто при вертикальному розташуванні інгальатора умови є менш критичні у порівнянні з горизонтальним розташуванням інгальатора, тому не потребують подальшого розгляду.

4.3 Резервуар порожній, положення інгальатора горизонтальне ($\alpha = 90^\circ$, Рис. 5), виводи світловода у верхньому положенні (гірший сценарій).

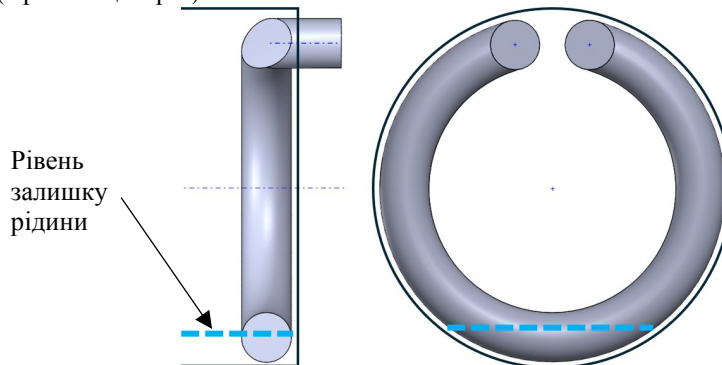


Рис. 5. Спорознілий резервуар, горизонтальне положення інгальатора.

Рівень залишку рідини повинен бути таким, щоб на зануреній ділянці світловода відбулося розсіювання достатньої кількості світлових променів.

5. Визначення втрат у світловоді при зануренні у повітря та рідини.

Задля можливості кількісної оцінки, здаємося конструктивними параметрами детектора. Нехай радіус світловода $a = 0.75$ мм; радіус тора $R = 8$ мм (Рис.6).

Для перевірки оптимальності радіуса світловода та його відповідності критичному радіусу згину світловода (чи відповідає він заданим конструктивним параметрам) визначимо числову апертуру [2]:

$$NA = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}, \quad (1)$$

n_1 , n_2 – показники заломлення світловода та зовнішнього середовища відповідно.

Числові апертури для комбінацій запропонованих матеріалів подані у Таблиці 3.

Табл. 3. Числова апертура для комбінацій матеріалів.

$n_1 \setminus n_2$	Повітря	Гліцерин	Пропіленгліколь
Полікарбонат (PC)	1.24	0.597	0.69
Плексиглас (PMMA)	1.10	0.22	0.41

Критичний радіус згину оптичного волокна:

$$R_c = \frac{a}{NA^2}; \quad (2)$$

a – радіус світловода, NA – числова апертура.

Критичний радіус згину світловода у повітрі та робочих рідинах подано у Таблиці 4.

Табл. 4. Критичний радіус згину світловода, R_c (mm).

$n_1 \setminus n_2$	Повітря	Гліцерин	Пропіленгліколь
Полікарбонат (PC)	0.49	2.1	1.6
Плексиглас (PMMA)	0.61	15.3	4.4

У комбінації матеріалів «плексиглас-гліцерин» критичний радіус вже перевищує конструктивно заданий, що переконливо свідчить про порушення повного внутрішнього відбивання у світловоді з цього матеріалу. Для даної комбінації слід очікувати максимальної різниці оптичного сигналу для наповненого та порожнього резервуара. Для врахування стрімкого росту втрат при наближенні вигину тора до критичного радіуса, згідно методики розрахунку втрат [2], для запропонованого способу вводиться перевірка:

$$\frac{R}{R_c} > 8n_2^2; \quad (3)$$

R – конструктивний радіус згину світловода, R_c – критичний радіус, n_2 – показник заломлення середовища.

Результати перевірки умови 3 в межах конструктиву інгалятора та для запропонованих матеріалів подані у Таблиці 5, де «+» - умова виконується, «-» - умова не виконується.

Табл. 5. Результати перевірки умови 3

$n_1 \setminus n_2$	Повітря	Гліцерин	Пропіленгліколь
Полікарбонат (PC)	+	-	-
Плексиглас (PMMA)	+	-	-

Таким чином, оптоволокну не працює як світловод при зануренні у робочі рідини усіх типів, отже передає значно ослаблений сигнал.

Втрати у світловоді, що перебуває у повітрі, визначаються використовуючи залежність для визначення втрат на макрозгинах оптоволокну [2]:

$$\alpha_R = 10 \lg \left\{ \left(n_1^2 - n_2^2 \right) / \left(n_1^2 - \left(\frac{\rho+1}{\rho-1} \right)^2 n_2^2 \right) \right\}; \quad (4)$$

де ρ – нормований радіус згину.

$$\rho = \frac{R}{2a}; \quad (5)$$

Для світловода з полікарбонату маємо $\alpha_R = 5.9$ дБ, з поліметилметакрилату (плексигласу) – $\alpha_R = 11.6$ дБ.

6. Геометричний метод визначення критичного рівня залишкової рідини.

Нехай у світловоді, що не контактує з рідиною (випадок порожнього резервуара інгалятора), існує пучок променів від джерела світла, які падають на стінку світловода під кутом, що перевищує критичний, внаслідок чого зазнають повного внутрішнього відбиття (Рис.6). Якщо пляма світла від такого пучка знаходиться на зануреній у рідину ділянці світловода, то промені покинуть його та не досягнуть фотоприймача, що спричинить зменшення рівня вихідного сигналу у порівнянні з «сухим» світловодом. Мінімальний рівень рідини, достатній для покриття цієї плями і буде критичним рівнем залишкової рідини.

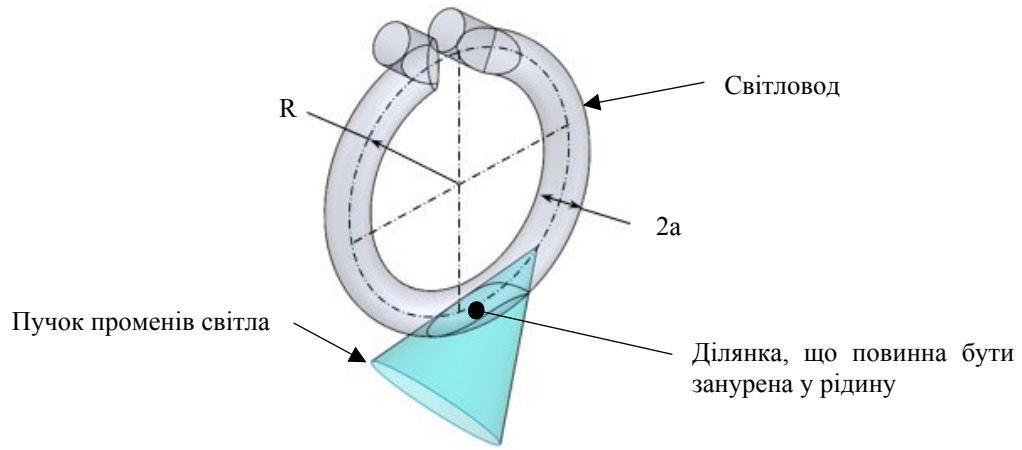


Рис. 6. Пучок променів у світловоді.

Запропонований метод дозволяє визначити висоту сегмента світловода h (Рис. 7), на який спирається пучок світла від джерела. Пучок утворено променями, що падають на стінку світловода під кутом, який перевищує або дорівнює критичному куту $\Theta_{кр}^n$ для повітряного середовища (Таблиця 2). Рідина повинна покривати світловод на цій ділянці щоб порушити повне внутрішнє відбивання. Розглядається хід променів у проекції, що робить найбільший внесок у рівень вихідного сигналу.

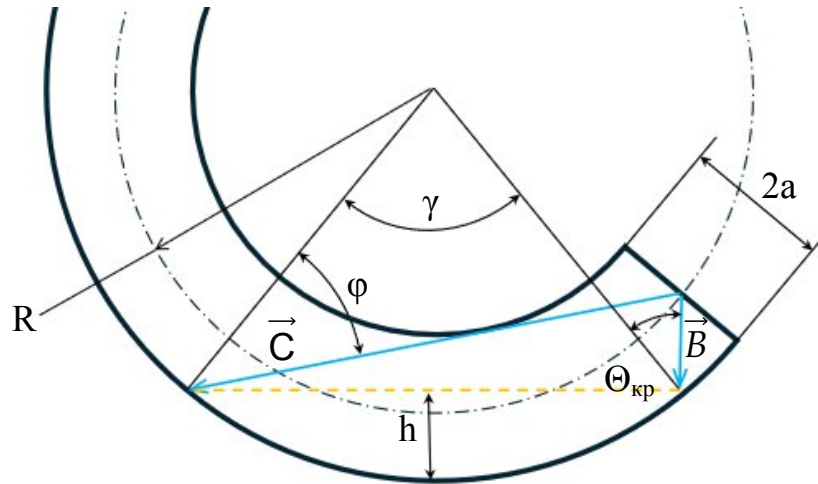


Рис. 7. Схема ходу променів.

R – конструктивний радіус центральної осі тороїдального світловода, a – радіус світловода, $\vec{B}, \vec{C}$ – крайні промені пучка світла, h – висота сегмента, на який спираються промені $\vec{B}$ та $\vec{C}$, φ – кут падіння променя $\vec{C}$, γ – центральний кут сегмента. Кут падіння променю $\vec{C}$ приймається рівним критичному куту $\Theta_{кр}$.

Таким чином, метод визначення рівня залишкової рідини полягає у такому:

1. Здійснюємо перевірку значення кута φ , чи не є він меншим за критичний:

$$\varphi = \sin^{-1}\left(\frac{R-a}{R+a}\right) \geq \Theta_{кр}; \quad (6)$$

Якщо умова не виконується, приймається $\varphi = \Theta_{кр}$. Для прийнятих конструктивних розмірів $\varphi = 56^\circ$, що є більше $\Theta_{кр}^n$ (Таблиця 2).

2. Обчислюємо висоту сегмента h , що визначиться залежністю:

$$h = (R + a) \left(1 - \cos \frac{\gamma}{2}\right); \quad (7)$$

де кут γ :

$$\gamma = \Theta_{кр} + \pi - \sin^{-1}\left(\frac{R+a}{R} \sin \Theta_{кр}\right) - \sin^{-1}\left(\frac{R-a}{R}\right) - \varphi; \quad (8)$$

Висота h та центральний кут сегмента γ подані у Таблиці 6:

Табл. 6. Значення кута γ та висоти сегмента h .

	γ°	h , мм
Полікарбонат (PC)	54.5	0.97
Плексиглас (PMMA)	53.9	0.95

Обчислена висота сегмента світловода h визначає критичний рівень робочої рідини у резервуарі та є пороговою глибиною занурення світловода у рідину, до якої резервуар інгалятора ще визначається, як наповнений. Подальше падіння рівня робочої рідини призведе до зменшення площі зануреної ділянки світловода та збільшення кількості променів світла, що досягнуть фотоприймача, та, як наслідок, отримання сигналу про спорожнення резервуара.

7. Експериментальна перевірка способу.

Метою експерименту була перевірка працездатності розробленого способу, а саме, фіксація зміни рівня вихідного оптичного сигналу при зануренні світловода у робочу рідину, перевірка припущення, що основний внесок у рівень вихідного сигналу роблять промені, що розповсюджуються у проекції, показаній на Рис.7, перевірка чутливості способу.

7.1 Матеріали та обладнання.

- Джерело оптичного випромінювання – світлодіод.
- Світловод: полікарбонатний стрижень діаметром 3.0 мм, довжина 1 м.
- Фотоприймач: оптичний сенсор мобільного телефона. Модель сенсора: TCS3701, Робочий діапазон: 0-60000 Люкс.
- Віртуальна лабораторія: мобільний додаток Phyrphox. Додаток забезпечує безпосередній доступ до сенсорів смартфона, у тому числі, до оптичного сенсора наближення та освітленості.
- Харчовий гліцерин.

7.2 Опис установки.

На Рис. 8а та 8б показано експериментальну установку.

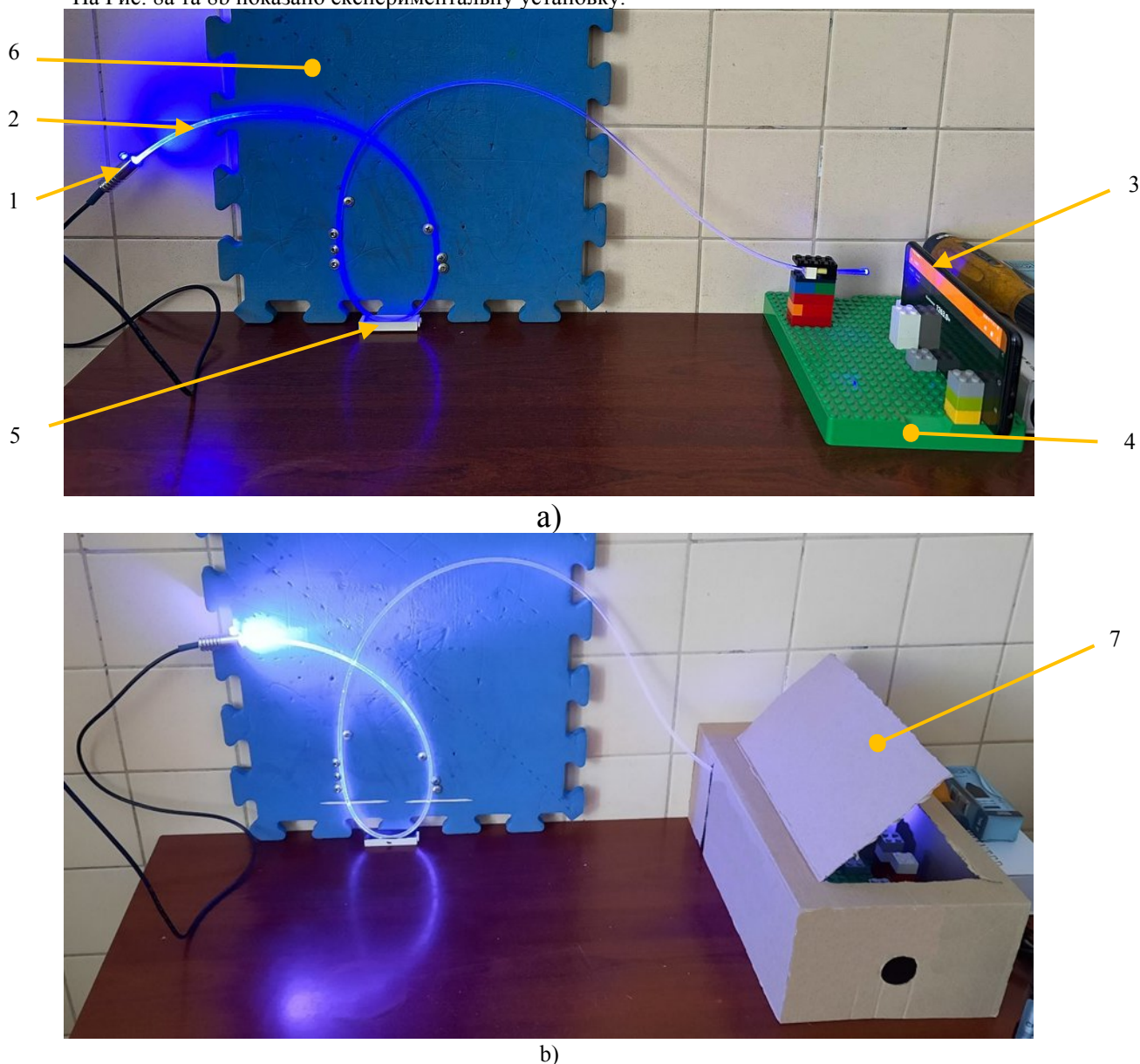


Рис. 8. Експериментальна установка

1 - джерело світла, 2 – світловод, 3 – фотоприймач, 4 – станина, 5 – ванночка для робочої рідини, 6 – монтажна панель світловода, 7 – світлозахисний кожух фотоприймача.

7.3 Методика проведення експерименту.

Експеримент проводиться за нормальних умов. Методика експерименту така:

- 1) Наповнення ванночки робочою рідиною
- 2) Занурення зігнутої частини світловода, що імітує тороїдальний детектор рідини, у ванночку.
- 3) Вмикання джерела світла
- 4) Запуск віртуальної лабораторії на смартфоні, закривання кришки кожуха світлоізоляції.
- 5) Переміщення монтажної панелі зі світловодом вверх до моменту, коли світловод опиниться вище рівня рідини. Цей етап імітує виснаження резервуара інгалятора, коли детектор не контактує з рідиною.
- 6) Занурення світловода у рідину до попереднього рівня. Цей етап забезпечує контроль повторюваності вимірювань.
- 7) Зупинка роботи віртуальної лабораторії, вимикання джерела світла.

7.4 Аналіз даних.

На Рис. 9 показано графік інтенсивності освітленості фотоприймача, що розташований навпроти вихідного торця світловода.

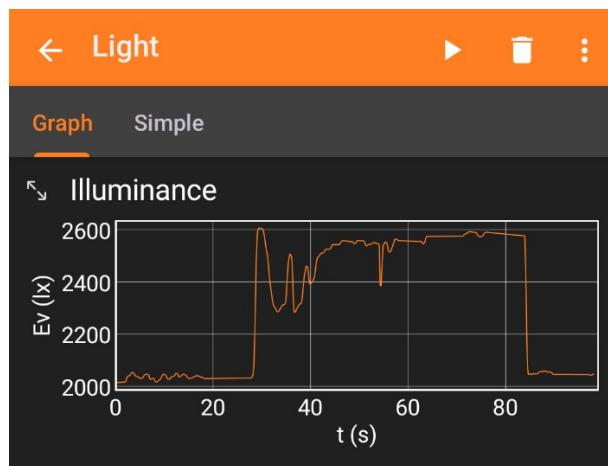


Рис. 9. Графік вихідного сигналу

На графіку чітко прослідковуються етапи експерименту: від 0 до ~30 с. – світловод у рідині, 30 – 85 с. – світловод «сухий», що імітує порожній резервуар інгалятора, з 85-ї секунди світловод повертається у ванночку з рідиною. Результати експерименту підтверджують працездатність способу, а також дозволяють зробити декілька важливих висновків: амплітуда зміни сигналу від виснаженого резервуара до наповненого складає 600 Люкс (30%), що говорить про достатню чутливість способу, стікання крапель робочої рідини відбувається достатньо швидко для зупинки роботи інгалятора та захисту від перегріву.

8. Висновок

Детектор рідини у вигляді тороїдального світловода, що виконано з полікарбонату або плексигласу, передає оптичний сигнал у разі, якщо його повністю або частково не занурено у робочу рідину – гліцерин або пропіленгліколь. Отриманий оптичний сигнал певного рівня є сигналом виснаження резервуара інгалятора. Залежність 7 дозволяє обчислити мінімальний рівень залишкової рідини для граничної умови експлуатації, що описано у п.4.3. Виконання інших граничних умов залежить від об'єму резервуара і є предметом технічного проектування.

Проведений експеримент підтвердив працездатність способу. Наявна чутливість способу дає підстави стверджувати про доцільність його практичного використання.

Модернізований інгалятор є інтелектуалізованим біомедичним пристроєм і може використовуватися у терапії дихальних шляхів.

Конфлікт інтересів

Автори заявляють, що фінансових чи інших потенційних конфліктів щодо цієї роботи немає

Список використаної літератури

- [1] Перцев І.М., Допоміжні речовини у технології ліків. Навчальний посібник для вищих фармацевтичних навчальних закладів. Харків, 2010, С.179, 420
- [2] О. Кушнір, Ю. Корчак, Л. Луців-Шумський, С. Рихлюк, Експериментальна оптика. Навчальний посібник. Видавничий центр ЛНУ імені Івана Франка, Львів, 2009. С. 177-182.
- [3] Properties of Polymers. D.W. van Krevelen, K. te Nijenhuis, 2009 Elsevier B.V., С. 229-236.
- [4] Зимон А.Д., Адгезия жидкости и смачивание. Москва: Химия. 1974. С. 15
- [5] Bishnu Pal, "Optical Fiber Sensors: A Versatile Technology Platform for Sensing", Journal of the Indian Institute of Science, VOL 94:3 Jul.–Sep. 2014

- [6] The Ultimate Guide to Float Level Sensors, [Online]. Available: <https://quickturn.rochestersensors.com/ultimate-guide-float-sensors.pdf>
- [7] Jiayuan Wang, "Liquid Level Sensing Using Capacitive-to-Digital Converters", Analog Dialogue 49-04, April 2015
- [8] Ultrasonic Level Sensor Working Principle, [Online]. Available: <https://abmsensor.com/what-is-an-ultrasonic-level-sensor/>
- [9] Zheng Guilin, X. Zhuan, "Fast dynamic liquid level sensor based on liquid resistance", Conference Paper, Oct. 2007, Conference: AFRICON 2007, DOI: 10.1109/AFRCON.2007.4401558
- [10] Liquid level sensor classification, Hunan Rika Electronic Tech Co., Ltd, 2022. [Online]. Available: <https://www.rikasensor.com/liquid-level-sensor-classification.html>
- [11] Houquan Liu, Hongchang Deng et. al., "Liquid Level Sensor Based on a V-Groove Structure Plastic Optical Fiber", Sep. 2018, Sensors 18(9):3111
- [12] Dong Wang, Yu Zhang et. al., "Quasi-Distributed Optical Fiber Sensor for Liquid-Level Measurement", Nov. 2017, IEEE Photonics Journal PP(99):1-1
- [13] J. E. Antonio-Lopez, J. J. Sanchez-Mondragon, Patrick Likamwa, D. A. May-Arrioja, "Fiber-optic sensor for liquid level measurement", Aug. 2011, Optics Letters 36(17):3425-3427
- [14] Haider, M.S.U.K., Chen, C., Ghaffar, A. et al. "Simultaneous measurement of liquid level and R.I. sensor using POF based on twisted structure". Sci Rep 15, 1163 (2025)
- [15] Sameer M. Chandani, Nicolas A. F. Jaeger, "Optical fiber-based liquid level sensor", Optical Engineering, Vol. 46, Issue 11, 114401, Nov. 2007

ISSN: 2617-846X (online)

Тихан Мирослав

Номер ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4910-6477>

Дідковський Олексій

Номер ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-4456-3649>

Дата отримання статті -15.09.25.

Дата фінального варіанту – 18.11.25.

Дата публікації- 30.12.25.