

УДК 535.2.616

<sup>1,2</sup>О.С. КОМАРОВА, <sup>1</sup>В.В. ХОЛІН, <sup>2</sup>М.Ф. ТЕРЕЩЕНКО, <sup>3</sup>С.В. ПАВЛОВ,

<sup>2</sup>М.Ф. БОГОМОЛОВ, <sup>4</sup>А.К. ЗІЛЬГАРАЕВА, <sup>3</sup>О.С. БЕЗКРЕВНИЙ, <sup>1</sup>А.В. РЕВА

## ВОЛОКОННО-ОПТИЧНИЙ МАЛОІНВАЗИВНИЙ ДИФУЗНИЙ РОЗСІЮВАЧ НА ОПТИЧНОМУ ВОЛОКНІ ДЛЯ ВНУТРІШНЬОТКАНИННОГО ЛАЗЕРНОГО ВПЛИВУ

<sup>1</sup>Приватне підприємство "Фотоніка Плюс", Черкаси;

<sup>2</sup>Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського", Київ

<sup>3</sup>Вінницький національний технічний університет

<sup>4</sup>Казахський національний дослідний технічний університет імені К.І. Сатбаєва

**Анотація.** У статті проаналізовано технічні параметри малоінвазивних дифузних розсіювачів на дистальній ділянці полімерного оптичного волокна. Виготовлялися дослідні зразки дифузних розсіювачів з полімерних оптичних волокон виробництва Mitsubishi Rayon Corrogation (Японія) різної довжини: СК-20 діаметром 500 мкм та СК-10 діаметром 250 мкм шляхом механічної обробки їх світловідбиваючої оболонки для нанесення неоднорідностей та зміни умов повного внутрішнього відбиття.

Проведені дослідження створили основу для впровадження нових методів створення малоінвазивних дифузних розсіювачів на дистальній ділянці оптичного полімерного волокна.

**Ключові слова:** малоінвазивний дифузний розсіювач, дифузор, внутрішньотканинний лазерний вплив, полімерне оптичне волокно.

DOI: 10.31649/1681-7893-2021-41-1-39-46

### Вступ

Подальша оптимізація внутрішньотканинних лазерних впливів у процесі лазерної хірургії, лазеріндукованої термотерапії, фотодинамічної терапії, фотокерованої терапії неможлива без удосконалення параметрів волоконно-оптичних світловодних інструментів, і насамперед їх дистальних ділянок. Одним із варіантів реалізації дистальних ділянок є малоінвазивний дифузний розсіювач із прийнятними оптичними характеристиками.

Волоконно-оптичні світловодні інструменти (далі за текстом світловоди) забезпечують доставку оптичного випромінювання до патологічної зони. В ідеальному випадку потік оптичного випромінювання на виході введеного в патологічний об'єм світловода повинен накрити весь цей об'єм із забезпеченням однакових питомих енергетичних параметрів впливу в його межах та мінімальним охопленням інтактних тканин. На практиці патологічні зони мають різні контури та об'єм відмінні від правильних форм. Тривіально виконаний дистальний кінець світловода у вигляді плоского торця і усічений межами апертурного кута в оптичному щільному середовищі біотканини потік випромінювання суттєво обмежують або роблять практично неможливим застосування внутрішньотканинного лазерного впливу. Актуальною стає реалізація різних варіантів дистальних ділянок світловодів, що дозволяють забезпечити різні трансформації оптичного потоку з максимальним урахуванням розмірів та контурів патологічних об'ємів для високої ефективності процедури. Одним із таких варіантів може бути малорозмірний дифузний розсіювач.

Дифузний розсіювач перерозподіляє випромінювання, що розповсюджується у світловоді в межах апертурного кута, формуючи рівномірний циліндричний профіль випромінювання, що розсіюється уздовж всієї довжини дифузора.

При внутрішньотканинному лазерному впливі дифузні розсіювачі вводяться в патологічну зону через просвіт колючого інструменту. При цьому малотравматичність та малоінвазивність процедури може бути забезпечена шляхом створення дифузних розсіювачів безпосередньо на дистальних ділянках світловода.

**Метою даної роботи** є аналіз технічних параметрів малоінвазивних дифузних розсіювачів, створених на дистальній ділянці оптичного полімерного волокна.

### **Матеріали та методи.**

В даний час в лазерній медицині застосовуються різні типи волоконних світловодів з точки зору матеріалів і розмірів, що використовуються [1].

Типові розміри серцевини широкоапертурних кварц-полімерних оптичних волокон дорівнюють 200 - 800 мкм, товщина оболонки, що відбиває - 30 - 70 мкм, діаметр оптичного волокна в захисній оболонці становить 800 - 2 000 мкм. Створення дифузного розсіювача на такому типі волокон можливе декількома методами, реалізованими у роботі [2]. Опромінювачі на основі окремо створених дифузних розсіювачів, наконечник, що розсіює створюється закріпленням трубки з полімеру на торці волокна [2], або закріпленням наконечника, що розсіює, сформованого на скляній колбі шляхом зварювання. Інший варіант створення циліндричних кварцових опромінювачів – хімічним методом [2], після хімічної обробки кварцова серцевина розміщується в силіконову трубку діаметром до 1 мм. При такому методі після протруювання та обробки світловода хімічними розчинами зменшується діаметр серцевини і відповідно зменшується кількість збуджуваних світлових мод пропорційна кількості світлової енергії, що передається світловодом. Обидва способи збільшать порядок розмірів готового виробу.

У полімерних оптичних волокнах (ПОВ) типові розміри серцевини від 200 до 980 мкм, при цьому зовнішній діаметр оболонки (відбиваюча оболонка + захисна оболонка) всього на 15 - 20 мкм більше діаметра серцевини. Таке співвідношення діаметрів серцевини та оболонки ПОВ дозволяє доставляти необхідну кількість лазерного випромінювання в зону впливу при використанні ПОВ менших зовнішніх діаметрів у порівнянні з кварцовими/полімер-кварцовими оптичними волокнами, забезпечивши тим самим малоінвазивність процедури, що видно з рисунку 1. Також варто зазначити, що таке співвідношення діаметрів «серцевина-оболонка» ПОВ полегшує його стикування для створення комбінованих світловодів, що складаються зі стаціонарних ділянок на основі кварцового волокна та витратних ділянок на основі ПОВ. Полімерне волокно випереджає кварцове волокно за співвідношенням ціна-продуктивність.

Полімерні волокна здатні працювати у широкому температурному діапазоні (від – 40 до +85°C). Їм властива висока гнучкість при відносно великих діаметрах і без шкоди для оптичних характеристик здатність витримувати без руйнування багаторазовий вигин [3,4,5].

ПОВ властива невисока абразивна міцність, яка дозволяє сформувати дифузний розсіювач безпосередньо на дистальній ділянці світловода шляхом механічної обробки бічної поверхні волокна найпростішими абразивними матеріалами. У статті [6] авторами показано, що сколені лезом торці ПОВ діаметром 500 мкм забезпечували передачу 93 - 96%% потужності лазерного випромінювання щодо 100% потужності відполірованого торця.

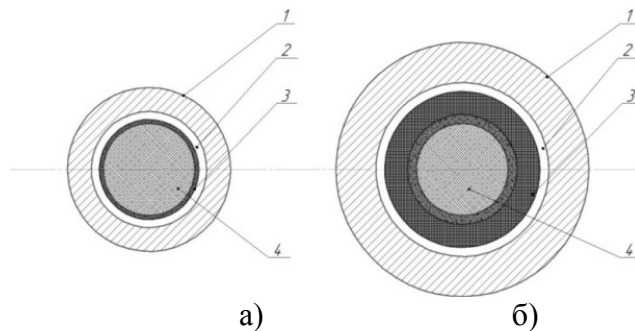


Рис. 1. Зріз по поперечному перерізу пункційної голки з полімерним оптичним волокном і кварцовим оптичним волокном з однаковими серцевинами, 1 – зовнішній діаметр пункційної голки, 2 – внутрішній діаметр пункційної голки, 3 – зовнішній діаметр оптичного волокна, 4 – серцевина: а) з полімерним оптичним волокном б) із кварцовим оптичним волокном.

Враховуючи вищевикладене, для створення малоінвазивних дифузних розсіювачів на дистальних ділянках оптичних волокон були використані ПОВ із серцевинною із поліметилметакрилату (ПММА).

Для експериментів виготовлялися дослідні зразки дифузних розсіювачів з полімерних оптичних волокон виробництва Mitsubishi Rayon Corporation (Японія) різної довжини: СК-20 діаметром 500 мкм і СК-10 діаметром 250 мкм, шляхом механічної обробки їх світловідбивальної оболонки. Така обробка призводить до зміни умов повного внутрішнього відображення мод, що розповсюджуються в полімерному світловоді. Як наслідок, спостерігається значне розсіювання світлових мод на обробленій поверхні, що дозволяє створити дифузний розсіювач.

Для зручності складання оптичної схеми проксимальний кінець оптичного волокна армувався капіляром з нержавіючої сталі з подальшим поліруванням торців світловода та створенням оптичних дифузних розсіювачів.

Дифузні розсіювачі з довжиною гнучкої ділянки 500 мм, довжинами робочої частини 50 мм і 10 мм формувалися на бічній поверхні полімерного оптичного волокна.

Також у роботі використовувалися: світловод SMA-905-SMA-905 (матеріал – кварц-полімер, довжина гнучкої ділянки – 2 м, діаметр оптичного волокна – 300/330 мкм, оптичний роз'єм (для підключення до апарата) – SMA-905), виробник ПП «ФОТОНІКА ПЛЮС» (Україна), світловод SMA-905 (матеріал – кварц-полімер, довжина гнучкої ділянки – 2,5 м, діаметр оптичного волокна – 600/900 мкм, оптичний роз'єм (для підключення до апарата) – SMA-905, тип світловода - "торцевий" з прямим виходом випромінювання), виробник ПП "ФОТОНІКА ПЛЮС" (Україна); перехідник під змінні світловоди; експериментальний лазерний термостабілізований модуль з довжиною хвилі 520 нм, виробник ПП "ФОТОНІКА ПЛЮС" (Україна); вимірювач потужності Coherent FieldMaster, Coherent (США), часовий індикатор ІЧ-1, юстирувальний оптичний стіл, стійка.

### Результати проведених досліджень:

Для проведення експериментів була зібрана експериментальна установка, схема якої зображена на рисунку 2.

За рахунок переміщення задіафрагмованого приймального пристрою вздовж дифузного розсіювача отримуємо набір значень потужності оптичного випромінювання по лінійній довжині дифузного розсіювача.

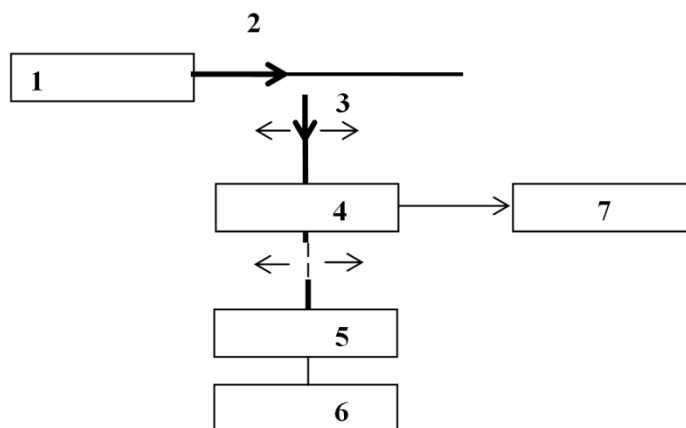


Рис. 2. Схема експериментальної установки: 1 – лазерне термостабілізоване джерело випромінювання, 2 – дифузний розсіювач стикований із світловодом SMA-905-SMA-905, 3 – приймальний світловод 4 – юстирувальний оптичний стіл, 5 – приймальна голівка вимірювача потужності, 6 – блок індикації вимірювача потужності, 7 – часовий індикатор.

Характер переміщення приймаючого світловода вздовж дифузного розсіювача показаний на рисунку 3.

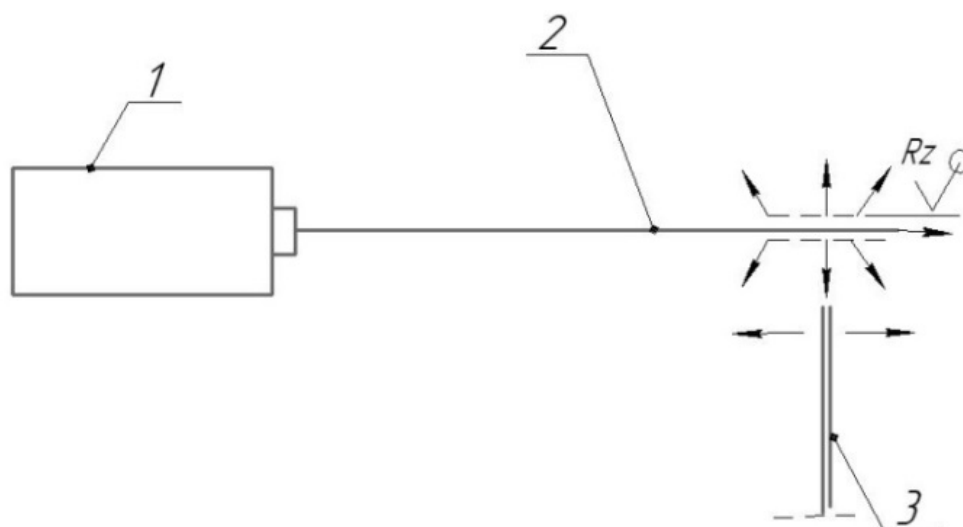


Рис. 3. Переміщення приймаючого світловода (3) вздовж дифузного розсіювача (2).

На початку експерименту оцінили стабільність роботи лазерного оптичного модуля. Світловоди при вимірах були прямолінійно витягнуті (не мали загинів малих радіусів).

На рисунку 2 зображено прямолінійне переміщення приймаючого світловода вздовж дифузного розсіювача. До стабілізованого джерела випромінювання (1) підключався світловод SMA-905-SMA-905 стикований через перехідник зі змінними дифузними розсіювачами (2) та фіксувався на стійці. Оцінка рівномірності розподілу вихідної потужності по лінійній довжині дифузного розсіювача визначалася приймальним світловодом (3) під'єднаним до приймальної голівки вимірювача потужності (5) зафіксованого на юстирувальному оптичному столі з мікрометричним

рухом (4) шляхом покрокового переміщення - 0,5 мм упорним часовим індикатором (7) вздовж дифузного розсіювача. У всіх проміжних положеннях приймального світловода (3) за допомогою індикації блоку вимірника потужності (6) реєструвалися значення потужності оптичного випромінювання [7,8,9].

У кожному експериментальному зразку дифузного розсіювача робилися заміри потужності вздовж довжини робочої частини дифузного розсіювача та на його торці. Після серії вимірів потужності вздовж довжини робочої частини дифузного розсіювача робився скол лезом (скол проводився під кутом 90° до осі волокна) дифузора і проводився вимір вхідної потужності оптичного світловода для оцінки потужності, що випромінюється цим дифузним розсіювачем.

Спочатку для проведення експериментів було створено дифузний розсіювач з робочою довжиною 50 мм на бічній поверхні полімерного світловода СК-20 діаметром 500 мкм, з довжиною гнучкої ділянки 500 мм. На рисунку 4 наведена діаграма розподілу потужності лазерного випромінювання, що розповсюджується зліва направо і розсіяного поверхнею дифузора. При ручній механічній обробці дистальної ділянки світловода довжиною 50 мм ми бачимо 3 інтенсивні піки розсіювання на ділянці довжиною 12 мм, нерівномірний розподіл світлової енергії і швидке згасання лазерного випромінювання на ділянці дифузора, що залишилася.

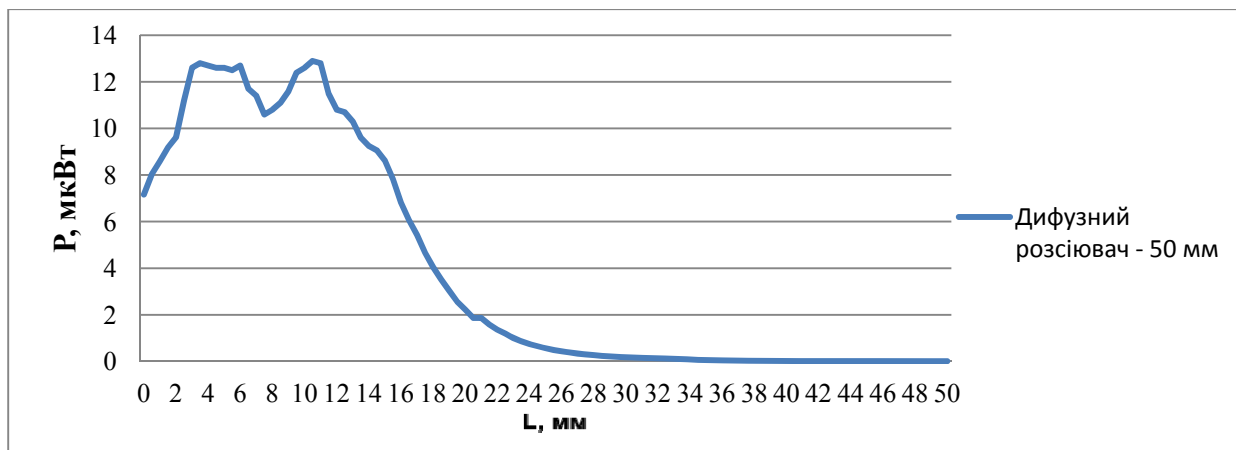


Рис. 4. Діаграма розподілу потужності лазерного випромінювання, що розповсюджується зліва направо і розсіяного поверхнею дифузного розсіювача діаметром 500 мкм і довжиною 50 мм.

Для визначення найбільш доцільної робочої довжини дифузного розсіювача на даному перерізі ПОВ при механічній ручній обробці було прийнято рішення поетапного сколу дифузора довжиною в 5 мм. Скол проводився під кутом 90° до осі волокна. На наш погляд найбільш доцільною на даному перерізі оптичного волокна є робоча довжина дифузного розсіювача - 10 мм.

Для серії вимірів було зроблено 10 дифузних розсіювачів робочою довжиною 10 мм на бічній поверхні полімерного світловода СК-20 діаметром 500 мкм з довжиною гнучкої ділянки 500 мм.

На рисунку 5 наведена діаграма розподілу потужності лазерного випромінювання, що розповсюджується зліва направо і розсіяного поверхнею дифузора №№ 1-10. На діаграмі вказана потужність лазерного випромінювання, що випускається бічною поверхнею дифузоров №№ 1-10. Інтенсивне розсіювання світла відбувається на початковій ділянці дифузоров довжиною 4 – 5 мм, надалі настає помітний спад інтенсивності.

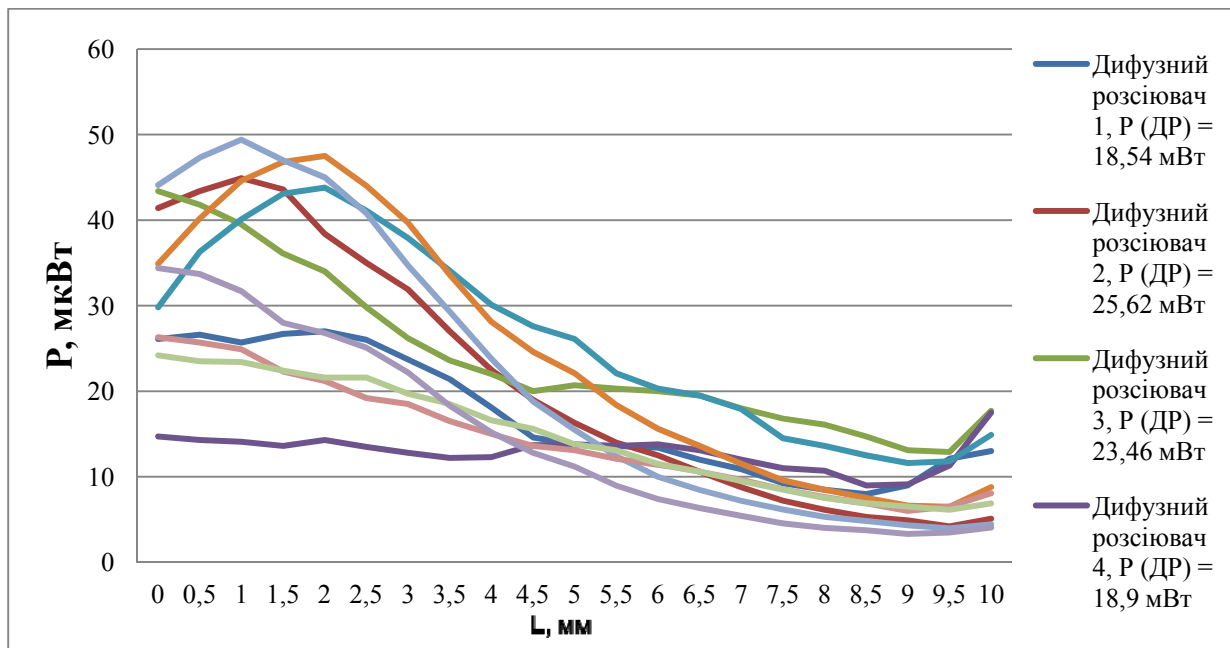


Рис. 5. Діаграма розподілу потужності лазерного випромінювання, що розповсюджується зліва направо і розсіяного поверхнею дифузних розсіювачів №№ 1-10 діаметром 500 мкм і довжиною 10 мм.

При створенні оптоволоконної системи до світловода SMA-905-SMA-905 діаметром 300/330 мкм через перехідник під змінні світловоди стиковували дифузний розсіювач на полімерному оптичному волокні. У місці стикування різних типів оптичних волокон відбуваються втрати через осьову незгодженість модових полів, втрати через різницю діаметрів модових полів, втрати через похибку куткового юстування осей оптичних волокон, втрати через різницю показників заломлення. Тому на кожен дифузний розсіювач ми отримуємо різну вхідну потужність, що потрібно враховувати при аналізі отриманих графіків.

Також для серії вимірів було зроблено 4 дифузні розсіювачі робочою довжиною 10 мм на бічній поверхні полімерного світловода СК-10 діаметром 250 мкм, з довжиною гнучкої ділянки 500 мм. На малюнку 6 наведена діаграма розподілу потужності лазерного випромінювання, що розповсюджується зліва направо і розсіяного поверхнею дифузора №№ 1-4.

При ручній механічній обробці дистальної ділянки світловода довжиною 10 мм і діаметром 250 мкм ми бачимо 2 інтенсивні піки розсіювання на ділянці довжиною 5 мм, нерівномірний розподіл світлової енергії і швидке згасання лазерного випромінювання на ділянці дифузора, що залишилася. На цьому перерізі полімерного оптичного волокна при механічній ручній обробці найбільш доцільною є робоча довжина дифузного розсіювача – 5 мм. Варто зазначити, що ПОВ діаметром 250 мкм дуже тонкі та незручні при різних маніпулюваннях [10].

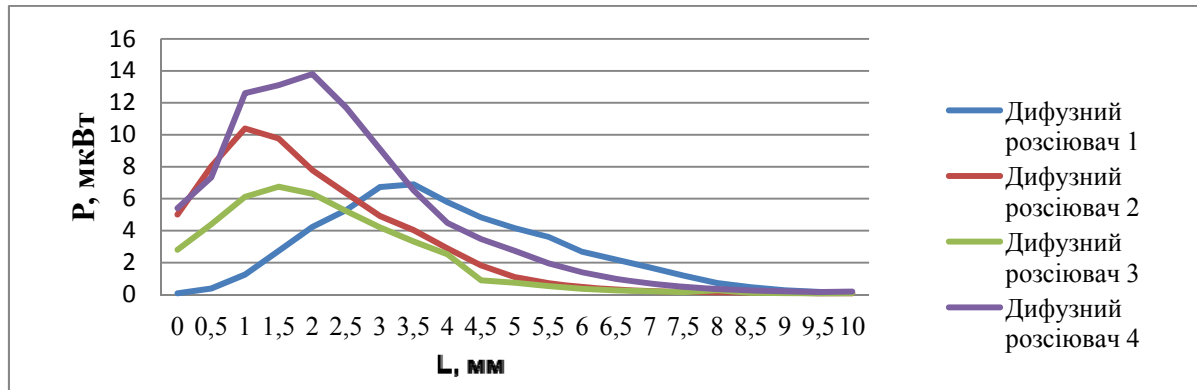


Рис. 6. Діаграма розподілу потужності лазерного випромінювання, що розповсюджується зліва направо і розсіяного поверхнею дифузного розсіювача №№ 1-4 діаметром 250 мкм і довжиною 10 мм.

**Висновки:** У статті проаналізовано технічні можливості реалізації малоінвазивних дифузних розсіювачів на дистальній ділянці полімерного оптичного волокна на основі виготовлених дослідних зразків дифузних розсіювачів з полімерних оптичних волокон виробництва Mitsubishi Rayon Corporation (Японія) різної довжини, шляхом механічної обробки їх світловідбиваючої оболонки для нанесення неоднорідностей та зміни умов повного внутрішнього відбиття.

Проведені дослідження створили основу для впровадження нових методів створення малоінвазивних дифузних розсіювачів на дистальній ділянці оптичного полімерного волокна і проведення подальших експериментів.

#### Список літератури:

1. Тучин В.В. Лазеры и волоконная оптика в биомедицинских исследованиях. 2-ое изд., испр. и доп. Москва: Физматлит, 2010. – 478 стр.
2. Волков В. В. Волоконно-оптические диффузные облучатели биотканей / В. В. Волков, В. Б. Лощенов, В. И. Конов, В. В. Кононенко / Квантовая электроника, 2010, том 40, номер 8, с. 746–750.
3. Сахно Т. В. Полимерные оптические волокна : монография / Т. В. Сахно, Г. М. Кожушко, А. О. Семенов, Ю. Е. Сахно, С. В. Пустовит. – Полтава : ПУЭТ, 2012. – 227 с.),
4. Мендес А. Справочник по специализированным оптическим волокнам / А. Мендес, Т.Ф. Морзе / Москва: Техносфера, 2012 – 728 с.,
5. Буряк В.П. Полимерные оптические волокна //Полимерные материалы.-2007.-№05.- С.16-24.
6. Холин В.В. Перспективы использования световодов на основе полимерных волокон для ФДТ / В.В. Холин, О.Н. Чепурная / Экспериментальные и клинические аспекты фотодинамической терапии : материалы научно-практического семинара с международным участием, г. Черкасы, 15-16 марта 2013 г. – Черкасы, Вертикаль, 213, с. 110-114.
7. Wójcik, W., Pavlov, S., Kalimoldayev, M. (2019). Information Technology in Medical Diagnostics II. London: Taylor & Francis Group, CRC Press, Balkema book. – 336 Pages, <https://doi.org/10.1201/9780429057618>. eBook ISBN 9780429057618.
8. Pavlov S. V. Information Technology in Medical Diagnostics //Waldemar Wójcik, Andrzej Smolarz, July 11, 2017 by CRC Press - 210 Pages. <https://doi.org/10.1201/9781315098050>. eBook ISBN 9781315098050.
9. Ж. М. Хоменко, А. К. Зильгараева, С. В. Павлов, і О. С. Безкрєвний, «Аналіз методів спектрофотометрії для виявлення властивостей біологічних тканин», Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології, 2019, вип. 38, вип. 2, С. 45–53, [doi.org/10.31649/1681-7893-2019-38-2-45-53](https://doi.org/10.31649/1681-7893-2019-38-2-45-53).

10. Ж. М. Хоменко, С.В. Павлов. Biometric signal processing at radar remote diagnostics of cardio-respiratory human activity, Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології, 2019, № 1. С. 50-54. doi.org/10.31649/1681-7893-2019-37-1-50-54

**Комарова Ольга Сергіївна** – інженер-технолог Приватного підприємства "Фотоніка Плюс", e-mail: komarova.ollha@gmail.com. Аспірант Національного технічного університету України „Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського”.

**Холін Володимир Вікторович** – директор, e-mail: info@fotonikaplus.com.ua. Приватне підприємство "Фотоніка Плюс".

**Терещенко Микола Федорович** – к.т.н., доцент кафедри виробництва приладів приладобудівного факультету, e-mail: agfarkpi@i.ua. Національний технічний університет України „Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського”.

**Павлов Сергій Володимирович** – д.т.н., проф. Вінницький національний технічний університет.

**Богомолів Микола Федорович** – к.т.н., доцент кафедри біомедичної інженерії факультету біомедичної інженерії, завідувач міжфакультетської лабораторії лазерної медицини, e-mail: mfbogomolov@gmail.com. Національний технічний університет України „Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського”.

**Зильгараева Алія Килишбаївна** – аспірант Казахського національного дослідного технічного університету імені К.І. Сатбаєва

**Безкровний Олександр Сергійович** – асистент, Вінницький національний технічний університет.

**Рева Анна Вікторівна** – інженер-конструктор, e-mail: Annissiya@meta.ua. ПП "Фотоніка Плюс".