



10. Розроблена проектна документація відображає всі особливості і переваги запропонованого способу управління.  
11. Розроблене АРМ оператора-технолога і налагодика САУ в SCADA-системі дозволяє зручно і ефективно спостерігати та керувати ходом процесом підготовки води.  
Подальший розвиток питання автоматизації управління процесом підготовки води знайде в магістерській випускній роботі.

#### Список використаних джерел

- [1]. Сайт Сібірської екологічної компанії.- URL: <http://www.sibecolog.ru/informatsiya/254/>
- [2]. Сайт компанії Ecosoft.- URL: [https://ecosoft.ua/sistemy-elektrodeionizatsii\\_prom/](https://ecosoft.ua/sistemy-elektrodeionizatsii_prom/)
- [3]. Сайт компанії V3.- URL: <http://www.v3corporation.ru/site.aspx?IID=2268391 &SECTIONID=2203010>
- [4]. Сайт компанії Diesel Engineering.– URL: <https://diesel.ru/shop/osmos/>
- [5]. Улибін В.М. Випускна робота бакалавра «Автоматизація процесу підготовки води для потреб підприємства «Інтрехім»» (Рукопис).- Одеса: ОНАХТ, 2020.- 165с.

#### References

- [1]. Sait Sibirskoi ekologichnoi kompanii.- URL: <http://www.sibecolog.ru/informatsiya/254/>
- [2]. Sait kompanii Ecosoft.- URL: [https://ecosoft.ua/sistemy-elektrodeionizatsii\\_prom/](https://ecosoft.ua/sistemy-elektrodeionizatsii_prom/)
- [3]. Sait kompanii V3.- URL: <http://www.v3corporation.ru/site.aspx?IID=2268391 &SECTIONID=2203010>
- [4]. Sait kompanii Diesel Engineering.– URL: <https://diesel.ru/shop/osmos/>
- [5]. Ulybin M. V. Vypusknа robota bakalavra «Avtomatyzatsiia protsesu pidgotovki vodi dlya ptreb pidpriemstva «Intrechim»» (Rukopys).- Odesa: ONAKhT, 2020.- 165s.

Науковий керівник О.Є. Гончаренко і ст. викладач С. М. Дубна

Отримана в редакції 15.10.2021. Прийнята до друку 29.11.2021. Received 15 October 2021. Approved Approved 29 November 2021. Available in Internet 04 December 2021.

УДК 543.275.1.089.68:681.586.5

## ЗАСІБ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ МОНІТОРИНГУ СТАНУ ВАНТАЖУ НА СУДНАХ-ГАЗОВОЗАХ НА ОСНОВІ ВОЛОКОННО-ОПТИЧНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Сандлер А.К., Данчук Д.П.

Національний університет "Одеська морська академія", м. Одеса, Україна  
E-mail: [albertsand4@gmail.com](mailto:albertsand4@gmail.com)

Copyright © 2021 by author and the journal "Automation of technological and business – processes".  
This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).  
<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>



DOI: 10.15673/atbp.v13i4.2202

**Анотація.** Дослідження базується на запиті практики про необхідність розробки й впровадження нових засобів волоконно-оптичних засобів моніторингу вологості газу, які, за рахунок підвищення вірогідності вимірювальної інформації, забезпечують зниження невиробничих втрат. У роботі вирішене актуальне науково-технічне завдання наукового обґрунтування, розробки й дослідження засобу моніторингу вологості газу. Пропонований засіб забезпечує підвищення достовірності результатів вимірювання за рахунок використання принципів часткової інваріантності до зовнішніх неконтрольованих впливів вимірювань, яка досягається шляхом синтезу процесів перетворення світла, конструкції, комбінації матеріалів і способу одержання вимірювальної інформації. Як об'єкт дослідження визначені процеси формування й перетворення інформаційного сигналу у волоконно-оптичному засобі моніторингу вологості газу у складних умовах транспортування. Відповідно, предметом дослідження є волоконно-оптичні засоби моніторингу, що функціонують у складних умовах експлуатації. Теоретична частина роботи виконана з використанням: а) системного аналізу й дослідження операцій – при визначенні структурних зв'язків між елементами вимірювального засобу діагностики й декомпозиції об'єкта дослідження; б) теорії оптичних хвилеводів – при розрахунках коефіцієнтів оптичного зв'язку ділянок оптичного волокна (ОВ); в) методів аналітичного дослідження процесів взаємодії полів хвилеводних елементів – при дослідженні процесів перетворення світлового випромінювання у чутливому елементі (ЧЕ) під впливом деформації. Проведено порівняльний аналіз впливу



експлуатаційних факторів на характеристики волоконно-оптичних пристроїв контролю властивостей газу на судах-газовозах. Проведений аналіз результатів впливу експлуатаційних дестабілізуючих факторів на характеристики пристроїв моніторингу відомих типів, дозволив локалізувати коло досліджень у межах використання волоконно-оптичних датчиків амплітудної модуляції. Визначено, що компенсацію некорельованої складової погрішності акселерометра необхідно виконувати на основі використання методів інваріантних перетворень, заснованих на принципі багатоканальності. Обрані методи, припущення і математичний апарат дослідження. Обґрунтовано застосування хвильового аналізу процесів у чутливому елементі (ЧЕ) засобу моніторингу на основі рівнянь Максвелла та методу рівних об'ємів. На підґрунті модифікованої теорії зв'язаних мод у оптичних волокнах, а також положеннях теорії пружності, сформована математична модель перетворення світлового випромінювання у пропонованому засобі моніторингу. Застосування запропонованого методу визначення параметрів синтезованого засобу діагностування на практиці створює передумови для розробки вимірювальних перетворювачів широкого цільового призначення.

**Abstract.** The research is based on the request of practice about the need to develop and implement new means of fiber-optic means of gas humidity monitoring, which, by increasing the reliability of the measured information, reduce non-production losses. The actual scientific and technical problem of scientific substantiation, development and research of the means of gas humidity monitoring is solved in the work. The proposed tool improves the reliability of measurement results by using the principles of partial invariance to external uncontrolled effects of measurements, which is achieved by synthesizing the processes of light conversion, design, combination of materials and method of obtaining measurement information. The processes of formation and transformation of the information signal in the fiber-optic means of gas humidity monitoring in difficult conditions of transportation are determined as the object of research. Accordingly, the subject of the study are fiber-optic monitoring tools that operate in difficult operating conditions. The theoretical part of the work was performed using: a) systematic analysis and study of operations - in determining the structural relationships between the elements of the measuring instrument of diagnostics and decomposition of the object of study; b) the theory of optical waveguides - when calculating the coefficients of optical coupling of optical fiber (OB); c) methods of analytical study of the processes of interaction of the fields of wave-wave elements - in the study of the processes of conversion of light radiation in the sensitive element (S) under the influence of deformations. A comparative analysis of the influence of operational factors on the characteristics of fiber-optic devices for monitoring the properties of gas on gas carriers. The analysis of the results of the influence of operational destabilizing factors on the characteristics of monitoring devices of known types, allowed to localize the scope of research within the use of fiber-optic sensors of amplitude modulation. It is determined that the compensation of the non-correlated component of the accelerometer error must be performed based on the use of invariant transform methods based on the principle of multichannel. Selected methods, assumptions and mathematical apparatus of research. The application of wave analysis of processes in the sensitive element (S) of the monitoring tool based on Maxwell's equations and the method of equal volumes is substantiated. Based on the modified theory of coupled modes in optical fibers, as well as the provisions of the theory of elasticity, a mathematical model of the transformation of light radiation in the proposed monitoring tool was formed. The application of the proposed method for determining the parameters of the synthesized diagnostic tool in practice creates the preconditions for the development of measuring transducers for a wide purpose.

**Ключові слова:** газ, судно-газовоз, моніторинг, вологість, волоконно-оптичний, чутливий елемент.

**Key words:** gas, ship-gas carrier, monitoring, humidity, fiber-optic, sensitive element.

## Вступ

Технологічні та кліматичні умови завантаження та транспортування на судах-газовозах можуть суттєво впливати на стан газових сумішів. Вплив морського навколишнього середовища та коливання параметрів режимів транспортування можуть сприяти додатковому зволоженню газу у транспортних танках. Несвочасне виявлення та усунення причин зволоження газу приводить до роботи обладнання на неспецифікаційних режимах та виходу з працездатного стану. З метою запобігання невиробничих втрат і для забезпечення безпеки судноплавства, рішення щодо здійснення всього логістичного комплексу заходів щодо суден-газовозів, приймаються виключно на підставі діагностичної інформації про реальний стан газових сумішів.

Сучасна концепція "превентивного моніторингу" ґрунтується на різних методах визначення стану об'єкту контролю, зокрема – ідентифікації зміни стану газоподібного вантажу на початковій стадії їх розвитку. Практичне використання цієї концепції вимагає впровадження новітніх, більш ефективних, автоматизованих засобів моніторингу і значно ускладнює процедури контролю вантажу. Тенденції розвитку сучасних технологій газових вантажних операцій свідчать, що саме застосування надійних, інваріантних до впливу зовнішніх збурень вимірювальних засобів, які легко імплементуються у суднові інформаційно-вимірювальні системи, забезпечують високу експлуатаційну ефективність та надійність функціонування суднового газовантажного комплексу.

В наш час засоби моніторингу стану вантажу газу на судах функціонують в умовах дестабілізуючих факторів – концентрованого впливу потужних електромагнітних, термічних та вібраційних полів потужного, компактно розташованого, суднового обладнання. Саме ці збурення не дозволяють забезпечити ефективний та достовірний моніторинг за головною контрольованою ознакою – наявністю вологи у газі.

Аналіз відомих рішень доводить, що завдання створення засобів моніторингу на основі волоконно-оптичних компонентів, які нечутливі до більшості експлуатаційних дестабілізуючих факторів (ДФ) та дають змогу



безперервного, тривалого і достовірного контролю стану газової суміші, є актуальним і затребуваним судновласниками, розв'язок і практичне використання якого суттєво підвищує рівень безпеки судноплавства [1, 2].

#### **Мета і завдання дослідження**

У якості мети дослідження визначено зниження непродуктивних втрат та аварійності, забезпечення високої ефективності використання суден-газовозів, що досягається впровадженням сучасних засобів моніторингу стану вантажу газу, які забезпечують підвищення вірогідності процесів моніторингу за рахунок використання принципів часткової інваріантності до зовнішніх ДФ на вимірювання.

Досягнення поставленої мети передбачає вирішення наступних завдань:

1. Визначення завадостійких до впливу експлуатаційних ДФ засобів моніторингу вантажу газу з подальшою оцінкою можливостей корекції вимірювальних погрешностей.
2. Створення математичної моделі оцінювання впливу зміни параметрів на метрологічні характеристики завадостійких та безпечних волоконно-оптичних засобів контролю вологості газу.

#### **Об'єкт, предмет та методи дослідження**

Як об'єкт дослідження визначені процеси формування й перетворення інформаційного сигналу у волоконно-оптичному засобі моніторингу вологості газу у складних умовах транспортування.

Відповідно, предметом дослідження є волоконно-оптичні засоби моніторингу, що функціонують у складних умовах експлуатації.

Теоретична частина роботи виконана з використанням: а) системного аналізу й дослідження операцій – при визначенні структурних зв'язків між елементами вимірювального засобу діагностики й декомпозиції об'єкта дослідження; б) теорії оптичних хвильоводів – при розрахунках втрат оптичного випромінювання при зв'язку ділянок оптичного волокна (ОВ); в) методів аналітичного дослідження процесів взаємодії полів хвильоводних елементів – при дослідженні процесів перетворення світлового випромінювання у оптичному чутливому елементі (ЧЕ) під впливом деформацій.

#### **Наукова новизна результатів дослідження**

Наукова новизна отриманих результатів полягає у наступному.

1. Вперше запропоновані теоретичні основи побудови засобу моніторингу, який, за рахунок обґрунтування й визначення конструкції та застосування матеріалів з особливими властивостями, відрізняється частковою інваріантністю до зовнішніх ДФ, що дозволяє здійснювати безперервний моніторинг вологості газу, підвищити якість та безпечність експлуатації суден-газовозів.
2. Отримав подальший розвиток метод синтезу волоконно-оптичного засобу моніторингу вологості газу, який відрізняється від відомих схемотехнічних рішень оптимізацією сполучення конструктивних параметрів і комбінацією матеріалів, що дозволяє практично здійснювати запропонований спосіб одержання інформації про стан вантажу газу.
3. Отримала подальшого розвитку математична модель волоконно-оптичного засобу моніторингу, яка відрізняється застосуванням модифікованої теорії зв'язаних мод, що дозволяє визначати та корегувати параметри засобу моніторингу за рахунок обліку властивостей реальних матеріалів, технології виробництва та особливостей експлуатації.

#### **Аналіз предмету дослідження та формалізація завдання що розв'язується**

На підставі аналізу результатів особливості експлуатації суден-газовозів визначено, що до основних елементів, технічний стан яких лімітує ефективність моніторингу властивостей вантажу, слід віднести, у першу чергу, датчики вологості газу. Надійність, термін використання датчиків багато у чому залежать від умов експлуатації, впливу навколишнього середовища та кількості робочих циклів. На основі дослідження закономірностей зміни технічного стану, причин та видів ушкоджень датчиків вологості газу визначено, що більшість розглянутих ушкоджень елементів датчиків майже не піддаються математичному опису, мають високу швидкість розвитку до критичного стану і складні для виявлення за непрямими діагностичними ознаками дефекти.

Суттєвою проблемою у моніторингу властивостей газів є відсутність стандартизованих табличних залежностей для парціального тиску водяної пари, коефіцієнтів стискальності для водяної пари, залежностей для перерахування одних одиниць вологості в інші. Види існуючих залежностей, що застосовуються у наш час, мають певні відмінності, що є джерелом до некоректної інтерпретації результатів вимірювання приладами різних виробників.

Актуальними є вимірювання вологовмісту при високих тисках газу у вантажних та транспортних системах. Діапазон тисків понад 10 МПа, з позицій гігроскопії майже не забезпечений метрологічно. З оглядом на те, що реальна поведінка газу в таких умовах суттєво відрізняється від визначеної теоретично, створюються умови для неможливості градуїровці датчиків при нормальних тисках з екстраполяцією результатів на більш високі тиски.

Крім того, актуальним завданням є вимірювання вологості у технологічних газах, що містять домішки вуглеводнів. Вимірювання температури крапки роси в таких газах приводить до недостовірних результатів вимірювання внаслідок неконтрольованого впливу домішок вуглеводнів на температуру крапки роси вологи [2].

На підґрунті проведеного аналізу зроблено наступний висновок. Подальше удосконалення процесів волоконно-оптичного засобу моніторингу вологості газу можливе на основі впровадження рішень, які добре зарекомендували себе в атомній енергетиці, а саме переходу до застосування високоточної вимірювальної техніки, створеної на основі волоконно-оптичних технологій.



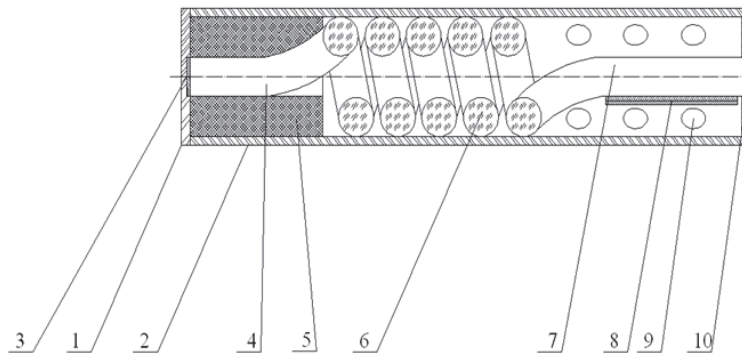
Таким чином спрямованість дослідження сформована на основі "запиту практики" про необхідність розробки й впровадження нових засобів моніторингу вологості газів, які забезпечать підвищення вірогідності вимірювальної інформації й зниження невиробничих втрат газотранспортному логістичному комплексу.

#### Аналіз волоконно-оптичних засобів моніторингу вологості газу

Для обрання схематичного рішення, яке найбільш повно відповідає задачам моніторингу стану вантажу газу на судах-газовозах, виконана оцінка потенційних можливостей волоконно-оптичних вимірювальних перетворювачів вологості газів відомих типів.

Відомий волоконно-оптичний датчик вологості газу, що складається з основи з кварцового скла до якої приварений відрізок перфорованої скляної трубки, віддзеркалюючого шару, утвореного на основі, блоку гігроскопічного матеріалу, розташованого між віддзеркалюючим шаром та спіральною ділянкою основного світловода (рис. 1) [3].

Перша пряма ділянка основного світловода нероз'ємно та коаксіально до скляної трубки прикріплена до віддзеркалюючого шару, а спіральна ділянка розташована концентрично до скляної трубки. До другої прямої ділянки світловода прикріплено біметалеву пластинку та скляну заглушку між світловодом та трубкою.

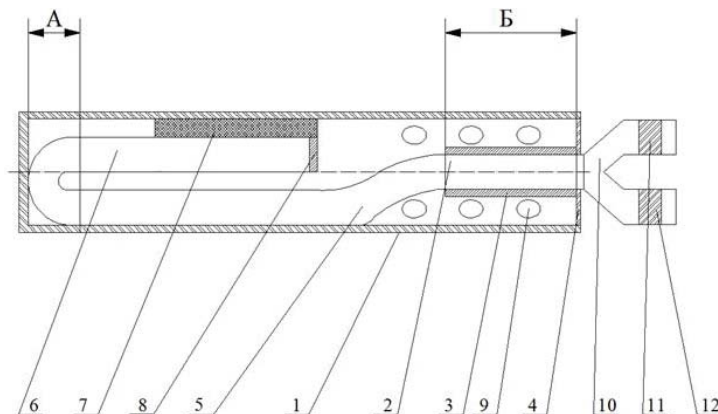


**Рис. 1 – Волоконно-оптичний датчик моніторингу вологості газу: 1 – основа, 2 – скляна трубка, 3 – віддзеркалюючий шар, 4 – перша пряма ділянка основного світловоду, 5 – блок з гігроскопічного матеріалу, 6 – спіральна ділянка основного світловоду, 7 – друга пряма ділянка основного світловоду, 8 – біметалева пластинка, 9 – отвори перфорації, 10 – заглушка.**

Основна відмінність від існуючих аналогів полягає у тому, що для передачі та прийому світлового випромінювання застосовано єдиний світловод без вільних оптичних поверхонь та для компенсації плинну температури навколишнього середовища застосовано біметалеву пластину.

Недоліком вказаного датчику, що суттєво впливає на його характеристики, є наявність сполуки біметалевої пластини та скляного волокна. С часом наявність такої сполуки ініціює початок деструктивних процесів у матеріалі світловоду. Інший недолік обумовлений контактом гігроскопічного матеріалу та світловоду, що утворює спіраль. Потрапляння вологи до матеріалу світловоду створює умови для пошкодження поверхні світловоду та порушення ідентичності витків спіралі. Вказані недоліки негативно відбиваються на метрологічних характеристиках датчику.

Більшою мірою вільний від згаданих недоліків волоконно-оптичний датчик вологості газу, що складається з перфорованої колби з кварцового скла до якої прикріплено взаємно зварені заглушка, основний світловод (рис. 2) [4].



**Рис. 2 – Волоконно-оптичний датчик вологості газу: 1 – колба; 2 – основний світловод; 3 – мідна трубка; 4 – заглушка; 5 – первинна гілка світловода; 6 – вторинна гілка світловода; 7 – блок з гігроскопічного матеріалу; 8 – віддзеркалюючий шар; 9 – отвори перфорації; 10 – оптичний розгалужувач; 11 – вхідний оптичний фільтр; 12 – вихідний оптичний фільтр.**



До основного світловоду та від якого крізь волоконний розгалужувач з оптичними фільтрами у кожній лінії надходить та відводиться випромінювання. До складу датчика також входить мідна трубка, розташована коаксіально до світловоду, первинної та вторинної гілок світловоду. Блок гігроскопічного матеріалу розташований між вторинною гілкою світловоду та колбою. Віддзеркалюючий шар утворений на торці вторинної гілки світловоду. Відмінністю датчика є те, що первинна і вторинна гілки встановлені з можливістю зміни радіуса згину між ними, а мідну трубку приварено до основного світловода.

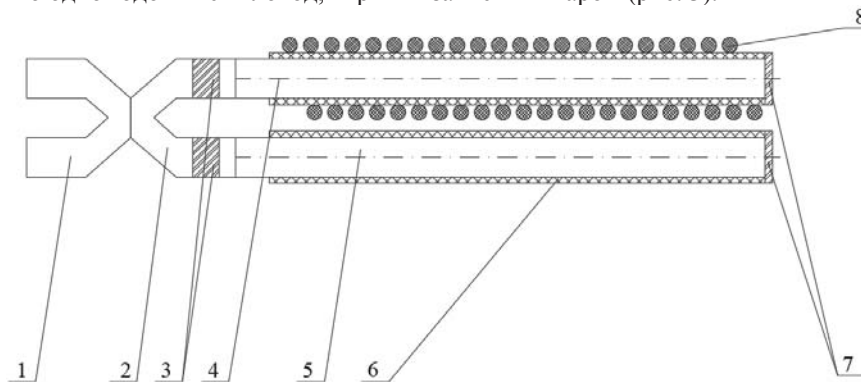
Поряд з перевагами, цьому датчику також притаманні певні недоліки. А саме – згинання скляного світловоду під кутом  $180^\circ$  є передумовою зменшення експлуатаційного ресурсу датчику. Це обмежує застосування датчику для вирішення задач моніторингу технологічних газів.

В той же час, встановлено, що розглянуті волоконно-оптичні датчики вологості газу, принцип дії яких заснований на модуляції величини інтенсивності світлового випромінювання під дією вимірюваної величини, найбільш прості, надійні і універсальні за застосуванням. На основі аналізу процесів руйнації скляних матеріалів під впливом фізико-механічних факторів зроблено такі висновки:

- засоби випромінювання у перетворювачах з відкритим або закритим оптичним каналом (ОК) під впливом експлуатаційних дестабілізуючих факторів є джерелом погіршення або деструкції ОВ та волоконного ЧЕ;
- найменшою мірою під вплив підпадають перетворювачі з закритим ОК, а при деформації ЧЕ слід уникати впливу на його бічну сторону;
- необхідне застосування методів автокорекції впливу ДФ на характеристики датчиків вологості [1].

Було запропоновано схематичне рішення, у якому зроблена спроба поєднати властивості, що задовольняють зробленим висновкам.

За основу прийнято одномодовий світловод, вкритий захисним шаром (рис. 3).



**Рис. 3 – Двоканальний оптичний датчик вологості газу: 1 – первинний розгалужувач; 2 – вторинний розгалужувач; 3 – оптичні фільтри; 4 – світловод вимірювального каналу; 5 – світловод контрольного каналу; 6 – захисний шар; 7 – віддзеркалюючий шар; 8 – котушка з гігроскопічного волокна.**

На вимірювальному світловоді створена пружна котушка з гігроскопічного волокна – аналога волосся біологічного походження. Волокно, навите на світловод створює у ньому попередню напругу. Контрольний світловод відрізняється відсутністю котушки. Обидва світловода, сполучені з оптичними розгалужувачами з оптичними фільтрами, утворюють контрольний та вимірювальний канал датчика. Захисний шар світловода утворює матеріал, наведений у [5].

Волокно фіксується на світловоді з попереднім натягом. В наслідок чого у світловоді утворюється напруження, яке знаходить своє відбиття у зміні показника профіля заломлення (ППЗ) матеріала світловода. З позицій метода рівних об'ємів сполучення напруженої та ненапруженої частин світловода є аналогом сполучення світловодів з різними апертурами. Після зволоження волокна його довжина збільшується, що ініціює зменшення напруження у світловоді. Тобто створюються умови для зрівнювання апертур двох ділянок вимірювального світловода [6].

Аналіз використовуваних методів підвищення точності й стабільності роботи ВОА показав, що реалізований у пропонованому рішенні метод інваріантних перетворень, заснованих на принципі багатоканальності, забезпечує достатню компенсацію некорельованої складової погрішності перетворювача.

#### **Створення моделі волоконно-оптичного датчика вологості газу**

Для дослідження процесів у запропонованому схематичного рішення волоконно-оптичного датчику вологості газу визначено ряд методів, припущень і математичний апарат. А саме, розглядати ЧЕ як багаточарову структуру, де однорідні зміни профілю показника заломлення, у наслідок деформації, еквівалентні зміні показника заломлення на постійну величину у деякій області поперечного перерізу. Ці процеси визначені з позицій хвильового аналізу, на основі рівнянь Максвелла. Зіставлення ОВ з різним ступенем збурення розглянуті на основі методу показника



заломлення рівного об'єму, а деформації – застосуванням моделі класичної механіки суцільних середовищ, що підкоряються закону Гука для анізотропного тіла [6, 7].

Для якісної й кількісної оцінки цієї взаємодії в оптичних розрахунках застосовується ряд методів. Спрямованості використовуваних методів сформовані з урахуванням двоїстої природи світлового випромінювання й різноманіття форм його транспортування. Ключовими позиціями більшості використовуваних методів є модель поширення світла (геометрична або хвильова) і модель, що імітує ОВ.

Розв'язок завдання модуляції амплітуди оптичного випромінювання шляхом впливу контрольованих процесів на характеристики матеріалу волокна також може бути знайдений кожним з відомих методів. Тому для оптимізації методологічного й математичного апарата, у дослідженні були, у першу чергу, конкретизовані враховані вище позиції. Також були введені припущення й обмеження, що найбільше суттєво впливають на кінцевий результат досліджень, незалежно від обраного методу й способу розв'язку завдання.

В ОВ звичайно не виконується умова малості довжини хвилі світла, що поширюється, у порівнянні з радіусом серцевини волокна й тому променева модель може приводити до значних погрешностей. На відміну від геометричного, хвильовий аналіз оптичних хвилеводів дає можливість розглядати процеси поширення світла не тільки тоді, коли розміри формуючої світлової пучок системи багато більше довжини хвилі, але й при будь-якій співвідношенні між ними. У зв'язку із цим, логічним є моделювання робочих процесів в ОВ на основі його діелектричної апроксимації.

Згідно з теорією, розв'язок рівнянь Максвелла, дозволяє точно визначити хвилеводні характеристики ОВ. Однак розв'язок можна одержати лише чисельними методами, що вимагають значного обсягу обчислювальних робіт.

Для подолання цього утруднення прийняте припущення, згідно з яким ОВ представляється як однорідна серцевина радіусом  $\rho$  з матеріалу з показником переломлення  $n_{co}$ , оточена нескінченно товстою оболонкою з матеріалу з показником переломлення  $n_{cl}$  ( $<n_{co}$ ). Це дозволяє, з попереднім уведенням наближення слабонапрямних хвилеводів, замінити рівняння Максвелла скалярним хвильовим рівнянням.

Друге допущення, засноване на попередньому, – це перехід до гауссового наближення, яке надає можливість одержати аналітичні вираження практично для всіх характеристик поширення хвилі в ОВ з довільним ППЗ [6, 7].

Перетворення гауссова пучка мод є гауссовим за формою, а перетворення однорідного пучка дає циліндричний аналог функції  $\sin x/x$ . Необхідно відзначити, що інтенсивність  $A^2(u)$  дифракційної структури однорідного пучка є майже гауссовою для значень  $ur_s$ , менших чому перший нуль функції  $J_1(ur_s)$ .

У теж час, гауссовий пучок з  $\rho \approx 0,75ur_s$  має майже таку ж інтенсивність дифракційної структури, як однорідний пучок радіуса  $r_s$ . Функція  $A^2(u)$  є майже гауссовою для пучків різних згладжених профілів, проміжних між однорідним і гауссовим. Це означає, що результати й висновки, отримані для гауссового пучка, широко застосовні для будь-яких ОВ з довільним ППЗ. Таким чином, хвильова модель поширення світла в сукупності із прийнятими допущеннями й завдяки своїй універсальності була вибрана базовою у даній роботі.

Згідно з теоремою Ліувілля й закону яскравості, хвилеводна структура, що має  $M_l$  мод, що направляються, може зібрати не більш  $M_l$  мод, що випромінюються збуджуючою хвилеводною структурою із числом мод  $M_0$ . Цей результат не залежить від типу оптичного зв'язку між хвилеводними структурами. Це дає підставу розглядати, у загальному випадку, завдання узгодження двох хвилеводних структур як порушення приймальної антени деяким заданим полем випромінюючої антени. При однаковій поляризації електричних полів, що збуджує  $\psi_1$  і порушуваної  $\psi_2$  хвиль і при неширокій діаграмі спрямованості двох апертур у наближенні еквівалентним наближенню Кірхгофа ефективність узгодження хвилеводних структур по потужності  $\eta$  є:

$$\eta = Tr \eta_0, \quad (6.1)$$

де  $Tr$  – коефіцієнт пропускання,  $\eta_0 = \frac{\int |\psi_1 \psi_2 ds|^2}{\int |\psi_1|^2 ds \int |\psi_2|^2 ds}$  – ефективність перекриття збуджуючого  $\psi_0$  і порушеного  $\psi_1$  полів, нормованих так, що  $\int |\psi_1|^2 ds = 1$  і  $\int |\psi_2|^2 ds = 1$ .

Таким чином взаємодію полів деформованої та недеформованої частини світловоду вимірювального каналу можливо розглядати як процес передачі оптичної потужності між хвилеводними структурами, зв'язаними через торцеві поверхні. Якщо поле основної моди збудженої ділянки вимірювального світловода описується гауссовою функцією з відповідним розміром плями пучка  $\rho_s$ , тобто

$$F_0(r) = \exp\left(\frac{-r^2}{2\rho_s^2}\right), \quad (6.2)$$

то кожне розузгодження можливо розглядати як відповідним чином орієнтований гауссовий пучок, спрямований на незбудовану ділянку. Частина потужності, втрачена при такому сполученні дорівнює  $1 - P_0/P_i$ .

Таким чином, для основної моди, поляризованої уздовж осі світловода:

$$\psi_0 = F_0 = \exp\left(\frac{-r^2}{2\rho_s^2}\right), \quad (6.3)$$

де  $\rho_s = \frac{\rho}{\sqrt{V}}$  – розмір плями моди;  $V$  – хвилеводний параметр.

Припустивши, що  $n_i = n_{co}$ , одержимо вираження для частини потужності пучка, що поширюється в основній моді

$$\frac{P_0}{P_i} = \left(\frac{2\rho_s r_0}{\rho_s^2 + r_0^2}\right)^2. \quad (6.4)$$



Вираз (6.4) описує співвідношення оптичної потужності при порушенні хвилеводу похилим пучком. Такий тип порушення є найбільш загальним випадком порушення поля.

Якщо пучок направляється на торець ОВ під кутом  $\theta_1$  до його осі, то

$$\frac{P_1}{P_i} = \left(\frac{2\rho^2}{\rho_s^2}\right) \frac{\left[\int_0^\infty F_1(R) J_1(kR) \exp\left(-\frac{R^2 \rho^2}{2\rho_s^2}\right) R dR\right]^2}{\int_0^\infty F_1^2(R) dR}. \quad (6.5)$$

Якщо при визначенні співвідношення (6.5) гауссовий пучок замінити однорідним з радіусом  $\rho_s$ , одержимо аналогічне вираження для слабонапрямого ОВ зі східчастим профілем показника переломлення

$$\frac{P_1}{P_i} = \left(\frac{2\rho^2}{\rho_s^2}\right) \frac{\left[\int_0^{\rho_s} F_1(R) J_1(kR) R dR\right]^2}{\int_0^\infty F_1^2(R) dR}. \quad (6.6)$$

Розглянемо

$$I_1 = \int_0^{\rho_s} F_1(R) J_1(kR) R dR \quad (6.7)$$

$$\left. \begin{aligned} \text{Для } \rho_s/\rho \quad F_1(R) &= J_1(UR)/J_1(U), & 0 \leq R \leq 1 \\ F_1(R) &= K_1(WR)/K_1(W), & 1 \leq R \leq: \end{aligned} \right\} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow I_1 = \int_0^{\rho_s} F_1(R) J_1(kr) R dr = I_3 + I_4. \quad (6.8)$$

$$I_3 = (J_1(U))^{-1} \int_0^1 J_1(UR) J_1(kr) R dr, \quad (6.9)$$

де  $K_1$  – функція Бесселя;  $W$  – параметр моди у оболонці;  $U$  – параметр моди у сердцевині.

Скористаємося інтегралом від добутку функцій Бесселя, тоді (6.9) перетвориться до вигляду

$$I_3 = (J_1(U))^{-1} \left( (U^2 - k^2)^{-1} R(k J_1(UR) J_{l-1}(kr) - U J_l(kr) J_{l-1}(UR)) \right) \Big|_0^1 = \\ = ((k J_1(U) J_{l-1}(k) - U J_l(k) J_{l-1}(U)) / (J_1(U) (U^2 - k^2))) \quad (6.10)$$

$$I_4 = \int_0^{\rho_s} \frac{K_1(WR)}{K_1(W)} J_l(kr) R dr. \quad (6.11)$$

Скористаємося інтегралом від добутку функцій Бесселя, тоді

$$I_4 = (K_1(W))^{-1} \left( (R(k K_1(WR) J_{l-1}(kr) - W J_l(kr) K_{l+1}(WR)) / (W^2 + k^2)) \right) \Big|_0^{\rho_s/\rho} = \\ = \rho_s (k K_1(Ws) J_{l-1}(ks) - W J_l(ks) K_{l+1}(Ws)) - \rho (k K_1(W) J_{l-1}(k) - \\ - W J_l(k) K_{l+1}(W)) ((K_1(W) (W^2 + k^2) \rho)^{-1} \quad (6.12)$$

Якщо повернутися до (6.4), то

$$\frac{P_1}{P_i} = \left(\frac{2\rho^2}{\rho_s^2}\right) \frac{[I_3 + I_4]^2}{I_2} = \frac{[I_3 + I_4]^2 4\rho^2 U^2 K_1^2(W)}{\rho_s^2 K_{l-1}(W) K_{l+1}(W)}. \quad (6.13)$$

Вираз (6.13) ураховує найбільш загальний випадок порушення хвилеводу. Якщо розглядати співвісне розташування пучка й одномодового хвилеводу, то впливає, що буде порушена тільки  $HE_{11}$ -мода й  $\theta_1 = ks = k = 0$ . Прийняття цих обмежень приводить до перетворення (6.13) до вигляду

$$\frac{P_0}{P_i} = \left(\frac{2U}{VW_s}\right)^2 \left[ \left(\frac{V^2}{U^2}\right) - \left(\frac{\rho_s - K_1(W_s)}{\rho K_1(W)}\right) \right]^2. \quad (6.14)$$

Під впливом механічних навантажень у результаті ефекту фотопружності світловод стає оптично анізотропним, тобто напрямки головних осей еліпсоїда діелектричної проникності збігаються з напрямками головних осей еліпсоїда напруги. Таким чином, прикладена до світловода навантаження приводить до збільшення щільності матеріалу і, відповідно, до збільшення діелектричної проникності.

Визначимо величини  $\sigma$  і  $\Delta\rho$  у сердечнику та оболонці, що відбиває, ОВ. При впливі на поверхню світловода розподіленого тиску намотаного волокна  $F_b$  зміна радіуса сердечника  $\Delta\rho_{co}$  повинна дорівнювати, за абсолютною величиною, зміні внутрішнього радіуса оболонки. Якщо виникаючий при цьому тиск на сердечник  $F_a$ , то величина зміни радіуса сердечника [8-10]

$$\Delta\rho_{co} = -\frac{1-\mu_1}{E_1} F_a \rho, \quad (6.15)$$

а величина зміни радіуса оболонки

$$\Delta\rho_{cl} = \frac{1-\mu_2}{E_2} M a + \frac{1+\mu_2}{E_2} N \rho_{co}^2 \rho_{cl}^2,$$

де  $\mu$  – коефіцієнт Пуассона;  $E$  – модуль Юнга;



$$M = \frac{F_a \rho_{co}^2 - F_b b^2}{\rho_{cl}^2 - \rho_{co}^2}; \quad N = \frac{(F_b - F_a)}{(\rho_{cl}^2 - \rho_{co}^2)}$$

Сила стискування світловода визначається як [10]

$$F = \frac{S_{max}}{\rho_{cl} t},$$

де  $S_{max}$  – максимальне статичне напруження волокна;  $t$  – крок навивання.

Тоді частина потужності, яка обумовлена перемінною дією сухого/ зволоженого волокна та з урахування майже лінійної залежності величини  $S_{max}$  від вологості контролюваного середовища, може бути визначена як

$$P_s = 1 - \left( \frac{2(\rho_{co} + \Delta\rho_{co})(\sqrt{k^2 n_{co}^2 - \beta^2})}{VW_s} \right)^2 \left[ \left( \frac{V^2}{((\rho_{co} + \Delta\rho_{co})(\sqrt{k^2 n_{co}^2 - \beta^2}))^2} \right) - \left( \frac{\rho_s - K_1(W_s)}{\rho K_1((\rho_{co} + \Delta\rho_{co})(\sqrt{\beta^2 - k^2 n_{cl}^2}))^2} \right) \right]^2$$

З урахуванням результатів досліджень, наведених у [11-13], доцільним є виконання світловодів вимірювального та контрольного каналів зі штучного сапфіру як матеріалу, який забезпечує необхідні механічні характеристики вимірювального пристрою системи для контролю вологості газу (при припустимому діапазоні геометричних розмірів), у всьому робочому діапазоні тиску та температури.

### Висновки

1. Визначено, що найбільш завадостійкими до впливу експлуатаційних факторів є волоконно-оптичні засоби моніторингу вологості газу на суднах, які побудовані на основі запропонованої схеми перетворювача з закритим оптичним каналом і захищеним чутливим елементом з зовнішньою навивкою пружного елемента, пружність якого залежить від вологості газового середовища. За результатами оцінки можливостей методів корекції погрешностей обґрунтовано обрання двоканальної схеми засобу моніторингу.

2. Визначена залежність параметрів оптичного, яка є основою математичної моделі засобу моніторингу, та в якій враховані властивості матеріалів та особливості технології виробництва.

### Список використаних джерел

- [1]. Сандлер, А. К. Метод підвищення ефективності діагностування технічного стану суднових газотурбінних установок на основі волоконно-оптичних технологій: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.22.20 / Київський університет інфраструктури та технологій. – К., 2021. – 20 с.
- [2]. Пеклер, В. В., Мамонтов, Г. М. Состояние и перспективы развития гигрометров и средств их метрологического обеспечения // Научное приборостроение. – 2003. – Т.13, № 3. – С. 12-18.
- [3]. Патент України № 79525. МПК (2013.01) G02B 6/00 G01N 25/56 (2006.1). Волоконно-оптичний гігрометр / А. К. Сандлер, Ю. М. Цюпко, О. А. Сандлер, К. Ю. Цюпко; заявники та володарі патенту Сандлер, А. К., Цюпко, Ю. М., Сандлер, О. А., Цюпко, К. Ю. – u201212093. – заявл. 24.10.2012; опубл. 25.04.2013, бюл. № 8. – 3 с.
- [4]. Патент України на винахід № 108519. МПК (2015.01) G02B 6/00 G01N 19/10 G01K 5/10. Волоконно-оптичний датчик клімат-контролю для вимірювання вологості і температури / А. К. Сандлер, Ю. М. Цюпко, О. А. Сандлер, К. Ю. Цюпко; заявники та володарі патенту Сандлер, А. К., Цюпко, Ю. М., Сандлер, О. А., Цюпко, К. Ю. – a201306835; – заявл. 31.05.2013; опубл. 12.05.2015, бюл. № 9. – 3 с.
- [5]. Патент РФ RU 2543694. МПК G02B1/10. Защитное покрытие для гигроскопических оптических материалов на основе лазерно-осаждаемых углеродных нанотрубок для целей оптоэлектроники и медицинской техники / Н. В. Каманина, П. Я. Васильев, П. В. Кужаков; Владелец патента Открытое акционерное общество "Государственный оптический институт им. С.И. Вавилова". – 2013118962/28; – заявл. 23.04.2013; – опубл. 10.03.2015.
- [6]. Снайдер, А., Лав, Д. Теория оптических волноводов. – М.: Радио и связь, 1987. – 656 с.
- [7]. Семенов, А. С., Смирнов, В. Л., Шмалько, А.В. Интегральная оптика для систем передачи и обработки информации. – М.: Радио и связь, 1990. – 224 с.
- [8]. Черненко, В. Д. Оптомеханика волоконных световодов. – СПб.: Политехника, 2010. – 291 с.
- [9]. Овчинкин, А. В. Исследование процессов взаимодействия компонентов волоконно-оптического кабеля под воздействием механо-термических нагрузок, возникающих при эксплуатации информационно-измерительных систем: дис. ... канд. техн. наук: 05.11.16. – Иркутск, 2004. – 145 с.
- [10]. Грузоподъемные машины: Учебник для вузов по специальности "Подъемно-транспортные машины и оборудование" / М. П. Александров, Л. Н. Колобов, Н. А. Лобов и др.: – М.: Машиностроение, 1986. – 400 с.
- [11]. Сандлер, А. К. Моделирование акселерометра маятникового типа / А. К. Сандлер // Вісник Черкаського державного технологічного університету. Серія: Технічні науки. – 2019. – №1. – Черкаси: ЧДТУ. – С. 75-81.



- [12]. Сандлер, А. К. Оптимізація конструктивних параметрів волоконного акселерометру / А. К. Сандлер // Slovak international scientific journal. – 2020. – № 42. – V.1. – P. 25-31.
- [13]. Сандлер, А. К. Чувствительный элемент волоконно-оптического акселерометра на основе сапфирового стекла / А. К. Сандлер // IX Міжнародна науково-методична конференція "Суднова електроінженерія, електроніка і автоматика". Матеріали конференції. – 2019. – С. 27-33.

## References

- [1]. Sandler A. K. (2021). Metod pidvyshchennya efektyvnosti diahnostuvannya tekhnichnoho stanu sudnovykh hazoturbinykh ustanovok na osnovi volokonno-optychnykh tekhnolohiy. [Method of improving the efficiency of diagnosis of the technical condition of ship's gas turbines plants based on fiber-optical technologies]. Abstract of dissertation for the degree of a candidate of technical sciences in specialty 05.22.20 / State University of Infrastructure and Technologies, Kyiv. [in Ukraine].
- [2]. Pekler, V. V., Mamontov, G. M. (2003). Sostoyaniye i perspektivy razvitiya gigrometrov i sredstv ikh metrologicheskogo obespecheniya. [Status and development prospects of hygrometers and means of their metrological support]. Nauchnoe priborostroenie. – V.13, No. 3. – S. 12-18. [in Russian].
- [3]. Patent of Ukraine 79525. IPC (2013.01) G02B 6/00 G01N 25/56 (2006.1). Volokonno-optychnyy hihrometr. [Fiber-optic hygrometer] / A. K. Sandler, Yu. M. Tsyupko, O. A. Sandler, K. Yu. Tsyupko; applicants and patent holders Sandler, A. K., Tsyupko, Yu. M., Sandler, O. A., Tsyupko, K. Yu. – u201212093. – dec. 10/24/2012; publ. 04/25/2013, bul. No. 8. – 3 p. [in Ukraine].
- [4]. Patent of Ukraine for invention № 108519. IPC (2015.01) G02B 6/00 G01N 19/10 G01K 5/10. Volokonno-optychnyy datchyk klimat-kontrolyu dlya vymiryuvannya volohosti i temperatury. [Fiber-optic climate control sensor for measuring humidity and temperature] / AK Sandler, Yu. M. Tsyupko, OA Sandler, K. Yu. Tsyupko; applicants and patent holders Sandler, A. K., Tsyupko, Yu. M., Sandler, O. A., Tsyupko, K. Yu. – a201306835; – stated. 31.05.2013; publ. 12.05.2015, bul. № 9. – 3 p. [in Ukraine].
- [5]. RF patent RU 2543694. IPC G02B1/10. Zashchitnoye pokrytiye dlya gigroskopichnykh opticheskikh materialov na osnove lazerno-osazhdayemykh uglerodnykh nanotrubok dlya tseley optoelektroniki i meditsinskoy tekhniki. [Protective coating for hygroscopic optical materials based on laser-deposited carbon nanotubes for optoelectronics and medical technology] / N. V. Kamanina, P. Ya. Vasiliev, P. V. Kuzhakov; Patent holder Open Joint Stock Company "State Optical Institute named after S.I. Vavilov". – 2013118962/28; – dec. 04/23/2013; – publ. 03/10/2015. [in Russian].
- [6]. Snyder, A., Love, D. (1987). Teoriya opticheskikh volnovodov. [Theory of optical waveguides]. – Moscow: Radio i svyaz'. [in Russian].
- [7]. Semenov, A. S., Smirnov, V. L., Shmalko, A. V. (1990). Integral'naya optika dlya sistem peredachi i obrabotki informatsii. [Integrated optics for information transmission and processing systems]. – Moscow: Radio i svyaz'. [in Russian].
- [8]. Chernenko, V. D. (2010). Optomekhanika volokonnykh svetovodov. [Optomechanics of fiber light guides.] – St. Petersburg: Polytechnika. [in Russian].
- [9]. Ovchinkin, A. V. (2004). Issledovaniye protsessov vzaimodeystviya komponentov volokonno-opticheskogo kabelya pod vozdeystviyem mekhano-termicheskikh nagruzok, vznikayushchikh pri ekspluatatsii informatsionno-izmeritel'nykh system. [Investigation of the processes of interaction of fiber-optic cable components under the influence of mechano-thermal loads arising during the operation of information-measuring systems]: dis. ... cand. tech. Sciences: 05.11.16. – Irkutsk. [in Russian].
- [10]. Gruzopod"yemnyye mashiny. [Hoisting machines]: A textbook for universities in the specialty "Hoisting and transport machines and equipment"(1986) / M. P. Aleksandrov, L. N. Kolobov, N. A. Lobov and others: – Moscow: Mashinostroenie. [in Russian].
- [11]. Sandler, A. K. (2019). Modelirovaniye akselerometra mayatnikovogo tipa. [Modeling of a pendulum-type accelerometer]. Cherkasy: Bulletin of the Cherkasy State Technological University. No. 1. –P. 75 – 81. [in Ukraine].
- [12]. Sandler, A. K. (2020). Optymizatsiya konstruktyvnykh parametrov volokonnoho akselerometru. [Optimization of design parameters of the fiber accelerometer]. Bratislava: Slovak international scientific journal. – № 42. VOL.1. – P. 25-31. [in Slovak].
- [13]. Sandler, A.K. (2019). Chuvstvitel'nyy element volokonno-opticheskogo akselerometra na osnove sapfirovogo stekla. [Sensitive element of a fiber-optic accelerometer based on sapphire glass]. Odessa: IX international scientific-methodical conference "Ship's electrical engineering, electronics and automation". [in Ukraine].

Отримана в редакції 27.10.2021. Прийнята до друку 29.11.2021. Received 27 October 2021. Approved 29 November 2021. Available in Internet 04 December 2021.