

УДК 681.7

С.С. ТУЖАНСЬКИЙ, А.М. САХНО, В.А. ШЕВЧУК, А.А. ПОПЛАВСЬКА

## ІНФРАЧЕРВОНИЙ ДАТЧИК ВМІСТУ ВОДИ В СКРАПЛЕНОМУ ГАЗІ

*Вінницький національний технічний університет,  
21021, вул. Хмельницьке шосе 95, м. Вінниця, Україна,  
E-mail: slavat@vntu.edu.ua*

**Анотація.** Фізико-хімічні, енергетичні та екологічні властивості природного газу роблять його перспективним видом палива. Важливим контрольованим параметром при зберіганні і транспортуванні зрідженого газу є фізичні властивості і розчинена в газі вода, яка впливає на роботу датчиків і технологічного обладнання. У роботі представлено конструкцію і схему оптоелектронного датчика для безконтактного контролю вмісту води у газових середовищах, який працює у спектральному діапазоні 1400–2400 нм.

**Abstract.** Physical, chemical, energy and environmental properties of natural gas make it quite promising type of fuel. An important parameter in the controlled storage and transport of liquefied gas are physical properties and gas dissolved in water, which affects the operation of sensors and process equipment for the construction of this instrument is presented for non-contact analysis of water content in gases, using infrared radiation in the range of 1400 – 2400 nm.

**Аннотация.** Физико-химические, энергетические и экологические свойства природного газа делают его перспективным видом топлива. Важным контролируемым параметром при хранении и транспортировке сжиженного газа являются физические свойства и растворена в газе вода, которая влияет на работу датчиков и технологического оборудования. В работе представлены конструкция и схема датчика для бесконтактного контроля содержания воды в газовых средах, который работает в спектральном диапазоне 1400 – 2400 нм.

**Ключові слова:** спектр, спектроскопія, концентрація, гігрометр, рідка фаза, парова фаза, конденсація, густина.

### ВСТУП

Скраплені вуглецеві гази сьогодні широко застосовуються як в якості палива для двигунів автомобільного транспорту, так і у промислових та сільськогосподарських установках [1]. Скраплений нафтовий газ (СНГ) – це суміш хімічних сполук, що складається переважно з водню і вуглецю з різною структурою молекул, тобто суміші вуглеводнів різної молекулярної маси і різної будови [2]. Основними компонентами скрапленого газу є пропан ( $C_3H_8$ ), бутан ( $C_4H_{10}$ ) і вуглеводні домішки (приблизно 1%) [3].

Основною перевагою скраплених газів є можливість існування при температурі навколишнього середовища і помірних тисках як у рідкому, так і в газоподібному стані. У рідкому стані вони легко переробляються, зберігаються і транспортуються, в газоподібному – мають кращі характеристики згорання.

Скраплені гази при зберіганні і транспортуванні постійно змінюють свій агрегатний стан. Так, частина газу випаровується і переходить в газоподібний стан, а частина конденсується, переходячи в рідкий стан. Тому важливим параметром для контролю при зберіганні та транспортуванні скрапленого газу є фізичні властивості та розчинена в газі вода, яка впливає на роботу датчиків та технологічного обладнання.

Для вимірювання і контролю вмісту води в газових середовищах застосовуються гігрометри, в основі яких лежать різні методи вимірювання вологості. Вибір методу вимірювання у кожному конкретному випадку визначається окремо залежно від вимірювальних задач [1, 2].

Скраплений нафтовий газ також містить незначну частку вуглеводних домішок – етилен, пропілен, бутилен, амілен, гексилен, гептан. Вплив останніх протягом довготривалого періоду на технологічне обладнання значно погіршує його роботу та може призвести до виходу його з ладу. Це зумовлено їх поганою розчинністю (етилен, пропілен, бутилен) та активним окисленням (амілен, гексилен, гептилен) [5].

Більшість сучасних датчиків контролю скрапленого нафтового газу є складними технічними системами і базуються на контролі співвідношення лише суміші пропан-бутан, тоді як наявність домішок не враховується. Основними недоліками такого підходу є складність технічного рішення та невисока точність вимірювання.

Для більш достовірних вимірювань необхідне застосування неконтактних методів вимірювання, що дозволяє виключити вплив агресивних домішок, а також спотворення результатів вимірювання вмісту води у газі внаслідок впливу спиртових сполук.

### ОСНОВНА ЧАСТИНА

Стан вуглеводневих систем визначається сукупністю впливів різних факторів, тому для повного їх аналізу необхідно визначити відповідні параметри. До основних параметрів, що піддаються безпосередньому виміру і впливають на скраплений газ, відносять тиск, температура, густина, в'язкість, концентрація компонентів та співвідношення фаз.

Разом з тим, існує ряд факторів, які ускладнюють широке використання СНГ в промисловості:

- сильна нелінійна залежність густини як рідкої, так і парової фази скрапленого газу від температури і співвідношення пропану і бутану (див. рис. 1, 2);
- фазові переходи при зміні температури, тиску або кількості скрапленого газу (випаровування, кипіння, конденсація);
- висока густина пари;
- широкий діапазон тиску в робочому діапазоні температур;
- схильність до утворення снігових, крижаних і кристалогідратних відкладень [4].

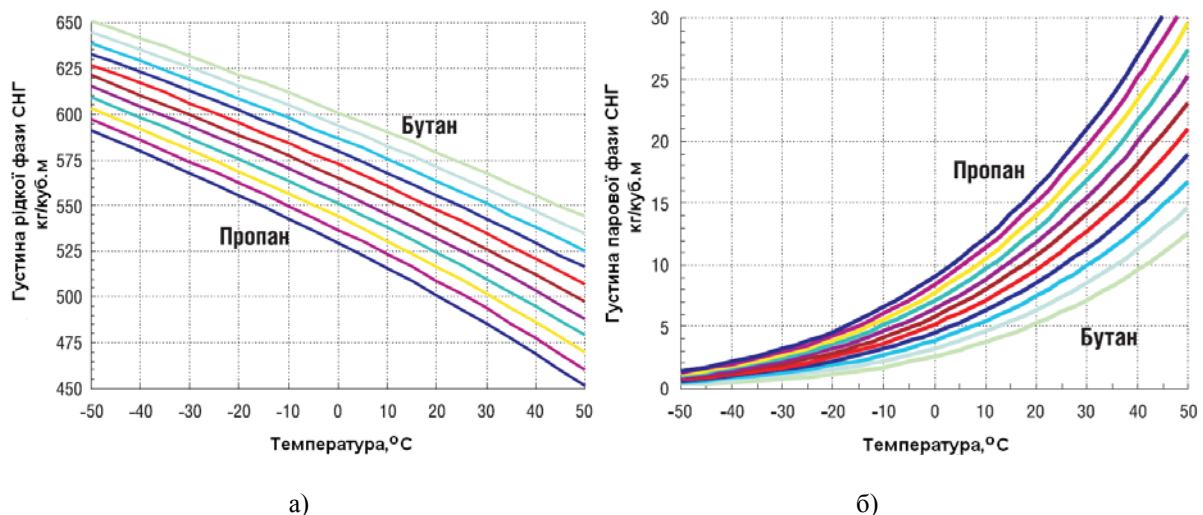


Рис. 1. Залежності густини рідкої фази від температури і компонентного складу (а) та густини парової фази (б) від температури і компонентного складу для скрапленого газу [3]

Переваги безконтактного методу вимірювання вмісту води у газах найбільш повно реалізує кількісна спектроскопія із використанням сучасних напівпровідникових лазерів [2-4]. Але вартість такої реалізації як правило є надзвичайно високою для даної задачі. У зв'язку з цим актуальною є задача розробки більш економічних сенсорів і систем вимірювального контролю вмісту води газових середовищ з підвищеними показниками чутливості, точності та безвідмовності.

Аналіз вмісту і властивостей складових речовин у газах визначається відповідними спектрами поглинання. Молекули, які обертаються і знаходяться в газовій або паровій фазі, набувають характерних значень енергії, тому вони поглинають випромінювання саме тих частот, які відповідають переходам між оберतालними енергетичними рівнями. Оскільки ці енергії низькі, то оберталні лінії поглинання зазвичай розташовані в дальній інфрачервоній області.

У випадку коливальних спектрів парів і газів смуги поглинання мають оберталну структуру, яка утворюється в результаті накладання оберталних енергетичних рівнів на коливальні енергетичні рівні. У рідинах обертална структура відсутня, оскільки обертання є занадто ускладненим. Порівняно із вузькими лініями всі смуги поглинання мають контури, симетричні відносно центрального максимуму із слабкими крилами в обидві сторони [5]. Чинником, що впливає на розподіл інтенсивності в газах, є природна ширина лінії, що зумовлена ефектом Доплера через затухання випромінювання.

Коливання в багатоатомних молекулах мають досить складний характер. Від числа активних

коливань, тобто від числа коливань, які супроводжуються зміною дипольного моменту молекули, залежить кількість смуг поглинання в інфрачервоному спектрі. Так, наприклад, у молекулі води їх 3 (основні) із частотами 1595; 3651,7; 3755,8 см<sup>-1</sup> (відповідно довжини хвиль – 6,27; 2,74; 2,66 мкм). Коливально-обертальний спектр води в ближній інфрачервоній області при довжинах хвиль, більших 0,9 мкм, містить ряд інтенсивних смуг поглинання з центрами біля 0,94; 1,1; 1,38; 1,45; 1,87; 2,7; 3,2; 3,6; 6,3 мкм. На рисунку 3 наведено залежність коефіцієнта поглинання від довжини хвилі.

Поглинання окремих діапазонів з частотою  $\nu$  описується основним законом спектроскопічних визначень концентрації – законом Бугера–Бера [5]:

$$I(\nu) = I_0(\nu)e^{-k(\nu)d}, \quad (1)$$

або в диференціальній формі

$$dI(\nu) = -k(\nu)I(\nu)dd, \quad (2)$$

де  $I_0(\nu)$  і  $I(\nu)$  – інтенсивності випромінювання до й після проходження через шар середовища масовою товщиною  $d$ ;  $dI(\nu)$  – ослаблення інтенсивності  $I(\nu)$  при проходженні через шар з масовою товщиною  $dd$ ;  $k(\nu)$  – коефіцієнт поглинання середовища при частоті випромінювання  $\nu$ .

Для суміші газів, у яких поглинання не залежить від інших компонентів суміші

$$I = I_0 \exp\left(-\left(\frac{k_1\rho_1}{\rho_{10}} + \frac{k_2\rho_2}{\rho_{20}} + \dots + \frac{k_i\rho_i}{\rho_{i0}}\right)d\right), \quad (3)$$

де  $\rho$ ,  $\rho_0$  – густина  $i$ -го газу відповідно у момент вимірювання і при нормальних значеннях температури та тиску.

Молекули  $H_2O$  характеризуються перервним спектром поглинання, що складається з численних, близько розташованих ліній, різних за протяжністю і інтенсивністю. Реальна величина коефіцієнта поглинання  $k(\nu)$  не є сталою і залежить від концентрації водяної пари (за винятком діапазону дуже низьких концентрацій), величини  $I_0(\nu)$ , а також парціального тиску і тиску непоглинаючих компонентів суміші. Результати вимірювань спектрів поглинання залежать від роздільної здатності спектрометричного приладу, зокрема від ширини спектральної щілини, яка навіть у спектрометрів високого розділення є більшою, ніж ширина окремих ліній обертально-коливальних смуг  $H_2O$  (рис. 3). Таким чином, для вимірювання вологості природного газу необхідно контролювати як температуру, так і тиск газу, а також встановити залежність поглинальних властивостей водяної пари та газу від довжини хвилі [6].

Функція поглинання  $A$  визначається в певному спектральному інтервалі (частоти  $\nu_1 - \nu_2$ ) і є відношенням поглинутої шаром середовища інтенсивності випромінювання до вхідної інтенсивності:

$$A = \frac{\int_{\nu_1}^{\nu_2} [I_0(\nu) - I(\nu)]d\nu}{\int_{\nu_1}^{\nu_2} I_0(\nu)d\nu}. \quad (4)$$

Скrapлений газ – це газова суміш, компонентами якої є суміш вуглеводнів ( $C_nH_{2n+2}$ ) та водяної пари, азот, двоокис вуглецю, сірководень, кисень, водень, аргон, гелій тощо. Це означає, що густина суміші газу й відповідно молярна маса його за стандартних умов можуть змінюватися. Тому необхідно виконувати додаткові вимірювання. Такі вимірювання можна проводити як прямими методами (вимірювання густини в реальному часі), так і непрямыми, опосередкованими (шляхом визначення густини як функції тиску й температури) [6].

Для вимірювання вологості природного газу необхідно контролювати як температуру, так і тиск газу, а також встановити залежність поглинальних властивостей водяної пари та газу від частоти  $\nu$  (або довжини хвилі  $\lambda$ ) [7].

Концентрацію води у скrapленому газі можна визначити на основі вимірювання різниці інтенсивностей опорного ( $\nu_2$ ) та вимірювального ( $\nu_1$ ) каналів схеми [5]:

$$C^e = \frac{K_{(v_1)}^e \cdot \left( \ln \frac{I(v_1)}{I_0} - \ln \frac{I(v_2)}{I_0} \cdot K_{(v_2)}^{c.z.} \cdot K_{(v_1)}^{c.z.} \right)}{d(K_{(v_1)}^e - K_{(v_1)}^{c.z.} \cdot K_{(v_2)}^e \cdot K_{(v_2)}^{c.z.})}, \quad (5)$$

де  $K^e(v)$  і  $K^{c.z.}(v)$  – питомі молярні показники поглинання сухого газу та води на частоті  $v$ , відповідно;  $\mu^e(v)$  і  $\mu^{c.z.}(v)$  – молярні маси сухого газу та води, відповідно.

Для удосконалення методу контролю рівня вологості скрапленого газу пропонується використання ближнього інфрачервоного спектру, який має найбільш характерні лінії поглинання водяної пари. При цьому враховуємо значення поглинання, яке вноситься на цих частотах і скраплений газ. Значення вологості газу отримують на основі співвідношення показників поглинання сухого газу та водяної пари в результаті проходження світлових потоків через газове середовище, які налаштовані на встановлені довжини хвиль та завдяки їх відмінним поглинаючим властивостям (рис. 3).

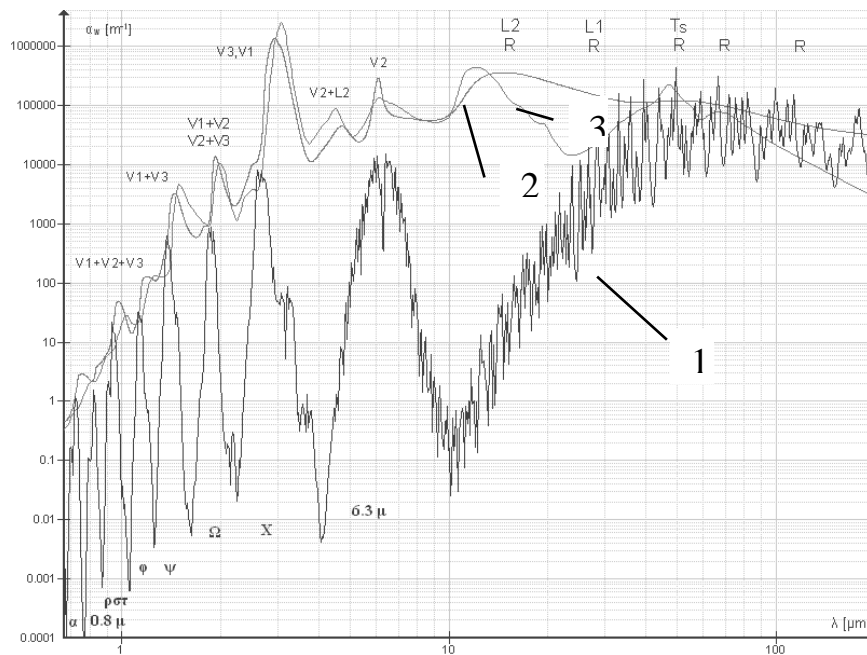


Рис. 3. Оптичний спектр поглинання води [4]: 1 – водяна пара; 2 – рідка вода; 3 – лід

Пропонується конструкція інфрачервоного сенсора контролю вмісту води у газових середовищах на такій елементній базі: світлодіод LED2350P (Thorlabs),  $\lambda=2350$  нм із широким спектральним діапазоном ( $\Delta\lambda=220$ нм); германієві об'єктиви; призма; срібне дзеркало, що направляє відбитий пучок випромінювання на фотодетектор, в якому формується результуючий оптичний сигнал, ПЗЗ-лінійний фотоприймач G9201-256S (Hamamatsu), світлофільтр WBP2000-2400, блок формування сигналів на ПЛІС EP4CE6E22C8N, мікропроцесорний блок керування на AT91SAM9CN11-CU. Структурну схему датчика наведено на рис.4.

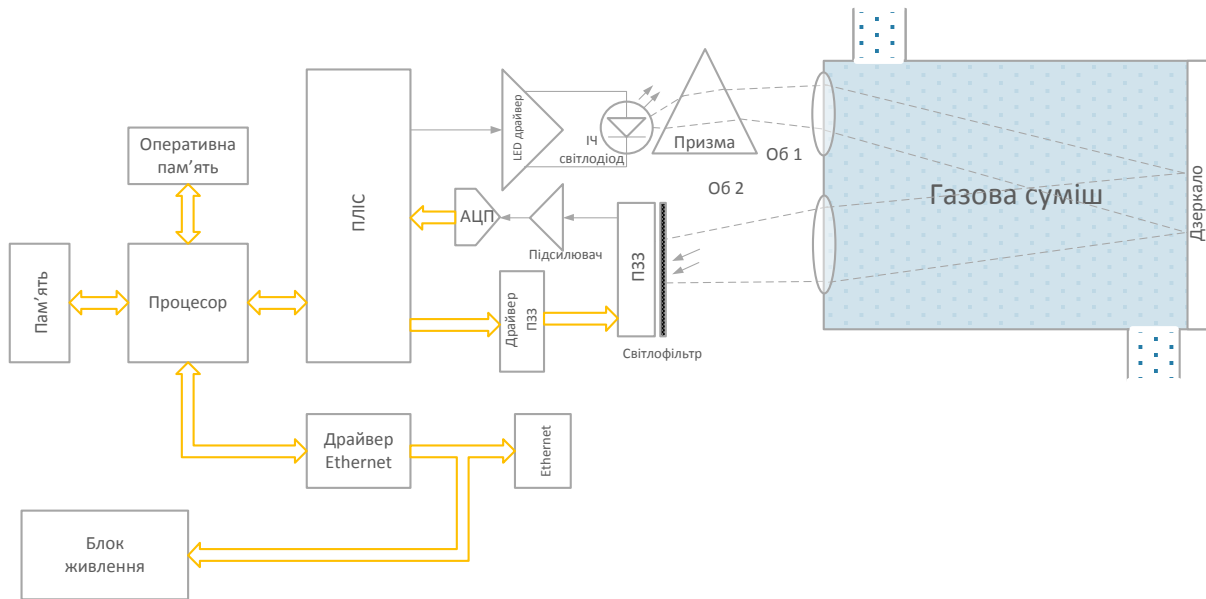


Рис. 4. Структурна схема датчика вмісту води в скрапленому газі

Пристрій працює наступним чином. Випромінювання світлодіода, розділене призмою за спектральними складовими, формується об'єктивом 1 у пучок променів і транслюється в муфту, в якій знаходиться скраплений газ. Після абсорбції газом випромінювання, відбите від дзеркала, розташованого на внутрішній стінці муфти через вихідний об'єктив 2 і світлофільтр на фотодетектор (ПЗЗ-лінійку). Пучок випромінювання, що приймається фотодетектором, має просторово розділену спектральну картину, тому різні групи пікселів лінійного ПЗЗ-фотодетектора реєструють окремі спектральні лінії вихідного випромінювання. Опорний пучок реєструється попередньо для еталонного газу, який не містить води. Мікроконтролер керує оптичним трактом та отримує цифровий сигнал з ПЗЗ через АЦП AD7401AYRWZ. В пам'ять пристрою встановлено програмне забезпечення, за допомогою якого процесор обробляє данні, що надійшли з мікроконтролера. Головною відмінністю схеми є те, що вимірювання базується на реєстрації просторово розділеної спектральної картини інтенсивностей світлового пучка, поглинутого водою у газі. Так формується спектральна функція інтенсивностей ПЗЗ-лінійки, з якої за наведеною вище у роботі методикою розраховується концентрація води (формула 5).

На рисунку 5 представлена 3D-модель конструкції датчика вмісту води в скрапленому газі.

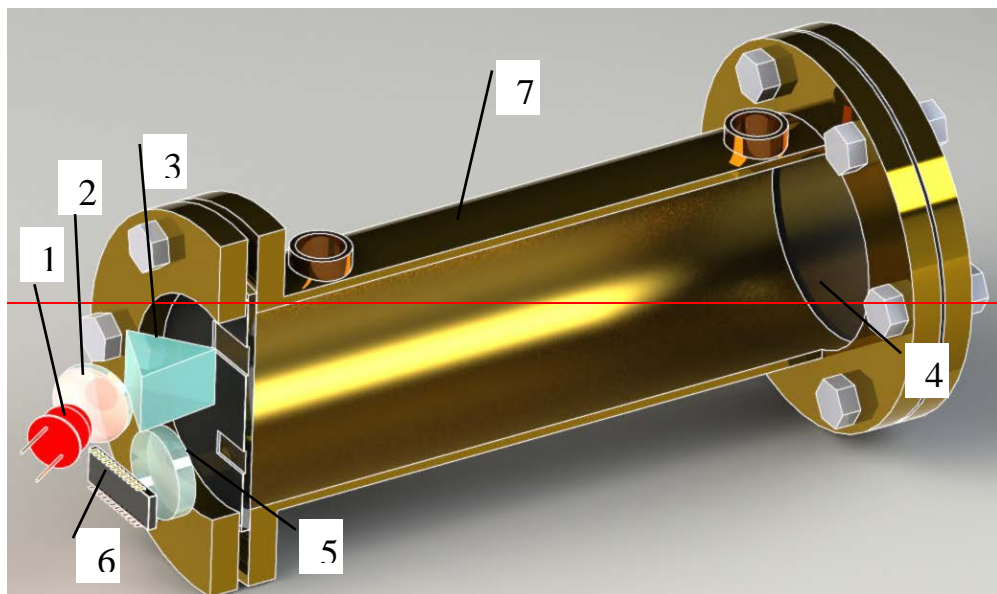


Рис. 5. Модель конструкції датчика вмісту води в скрапленому газі: 1 – світлодіод; 2 – об'єктив 1; 3 – призма; 4 – дзеркало; 5 – об'єктив 2; 6 – фотодетектор, 7 – муфта

Прилад потребує точного настроювання пучків випромінювання для формування на фотодетекторі просторової спектральної картини в межах його геометричних розмірів.

Таким чином, запропонований варіант реалізації датчику дозволяє збільшити точність вимірювань і достовірність контролю вмісту води, а також швидкодію засобу контролю.

### ВИСНОВКИ

Головною принциповою відмінністю запропонованого підходу і схеми для вимірювання вмісту води у скраплених газах є те, що принцип вимірювання базується на реєстрації просторово розділеної спектральної картини інтенсивностей світлового пучка, поглинутого водою у газі, на основі якої формується спектральна функція інтенсивностей ПЗЗ-лінійки фотодетектора. Простота конструкції і вибір сучасної елементної бази компонентів свідчать про те, що пристрій менш уразливий до більшості факторів, що обмежують точність вимірювань. Дестабілізуючі шумові фактори в цілому також будуть призводити до зміни яскравості спектру випромінювання, але вони можуть бути враховані у відповідних алгоритмах цифрової обробки сигналів.

Перераховані можливості дозволяють орієнтуватися на створення нового типу конкурентоспроможних датчиків вимірювання вмісту води в газі з покращеними характеристиками точності і швидкодії.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Крук І. С. Якість природних газів: довідник / І. С. Крук, О. М. Химко, О. І. Крук. – К.–Х.: Наука УЦЕБОП, 2010. – 407 с.
2. Кожем'яко В.П. Схемотехніка сучасного приладобудування. Ч.3 – Оптичні сенсори. Навчальний посібник / В. П. Кожем'яко, З. Ю. Готра, С. В. Павлов [та ін.]. – Вінниця: ВДТУ, 2002. – 164 с.
3. Коряков В. И. Приборы в системах контроля влажности твердых веществ и их метрологические характеристики / В. И. Коряков, А. С. Запорожец // Практика приборостроения. – 2002. – № 1. – С. 5–11.
4. Ивченко Ю. А. Чем измерить влажность? / Ю. А. Ивченко, А. А. Федоров // Датчики и системы. – 2003. – № 8. – С. 53–54.
5. Мухитдинов М. Оптические методы и устройства контроля влажности / М. Н. Мухитдинов, Э. С. Мусаев. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 96 с.
6. Онушко В. В. Універсальна класифікація оптичних методів дослідження густини газу / Й. Й. Білинський, Б. П. Книш, В. В. Онушко // Вісник Хмельницького національного університету. – 2100. – № 4. – С. 23–26. – ISSN 2226–9150.
7. Зайцев В. А. Влажность воздуха и ее измерение / В. А. Зайцев, А. А. Ледохович, Г. Т. Никандрова. – 1974. – 112 с.

Надійшла до редакції 24.06.2014р.

**ТУЖАНСЬКИЙ С. Є.** – к.т.н., доцент, доцент кафедри лазерної та оптоелектронної техніки, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, Україна, *E-mail: [slavat@vntu.edu.ua](mailto:slavat@vntu.edu.ua)*

**САХНО А. М.** – магістрант кафедри лазерної та оптоелектронної техніки, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, Україна, *E-mail: [constructors2000@gmail.com](mailto:constructors2000@gmail.com)*

**ШЕВЧУК В. А.** – магістрант кафедри електроніки, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, Україна, *E-mail: [valentina.shevchuk.2011@mail.ru](mailto:valentina.shevchuk.2011@mail.ru)*

**ПОПЛАВСЬКА А. А.** – магістрант кафедри лазерної та оптоелектронної техніки, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, Україна, *E-mail: [dsunny@mail.ru](mailto:dsunny@mail.ru)*