

Міністерство освіти і науки України  
Вінницький національний технічний університет

**Й. Й. Білинський, Б. П. Книш**

**ТЕРМООПТИЧНИЙ МЕТОД  
І ЗАСІБ ВИМІРЮВАЛЬНОГО КОНТРОЛЮ  
КОМПОНЕНТІВ СКРАПЛЕНОГО НАФТОВОГО ГАЗУ**

**Монографія**

Вінниця  
ВНТУ  
2017

УДК 681.12

Б-61

Рекомендовано до друку Вченою радою Вінницького національного технічного університету Міністерства освіти і науки України (протокол № 4 від 27.10.2016 р.)

Рецензенти:

**З. М. Теплюх**, доктор технічних наук, професор

**О. Є. Середюк**, доктор технічних наук, професор

**Білинський, Й. Й.**

Б-61 Термооптичний метод і засіб вимірювального контролю компонентів скрапленого нафтового газу : монографія / Й. Й. Білинський, Б. П. Книш. – Вінниця : ВНТУ, 2017. – 112 с.

ISBN 978-966-641-684-4

Робота спрямована на розв'язання актуальної задачі підвищення вірогідності вимірювального контролю масових часток компонентів скрапленого нафтового газу, який перебуває при різних температурах, шляхом знаходження значення густин рідкої фази. В роботі наведено удосконалену математичну модель оптико-електронного вимірювального перетворювача масових часток компонентів скрапленого нафтового газу і розроблено засіб вимірювального контролю масових часток компонентів скрапленого нафтового газу зі стабільними метрологічними та експлуатаційними характеристиками.

УДК 681.12

ISBN 978-966-641-684-4

© Й. Білинський, Б. Книш, 2017

## ЗМІСТ

ВСТУП.....	5
РОЗДІЛ 1 ОГЛЯД ВІДОМИХ МЕТОДІВ І ЗАСОБІВ ВИМІРЮВАЛЬНОГО КОНТРОЛЮ МАСОВИХ ЧАСТОК КОМПОНЕНТІВ СКРАПЛЕНОГО НАФТОВОГО ГАЗУ .....	6
1.1 Аналіз фізико-хімічних показників скрапленого нафтовогогазу.....	6
1.2 Аналіз відомих методів і засобів вимірювального контролю масових часток компонентів скрапленого нафтового газу .....	7
1.3 Вибір критерію оцінки ефективності вимірювальних перетворювачів.....	14
РОЗДІЛ 2 РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ ВИМІРЮВАЛЬНОГО КОНТРОЛЮ МАСОВИХ ЧАСТОК КОМПОНЕНТІВ СКРАПЛЕНОГО НАФТОВОГО ГАЗУ.....	17
2.1 Аналіз експлуатаційних показників скрапленого нафтового газу та його контроль.....	17
2.2 Розробка математичної моделі стану рідкої фази скрапленого нафтового газу .....	19
2.3 Розробка термооптичного методу вимірювального контролю масових часток компонентів скрапленого нафтового газу.....	24
2.4 Розробка математичної моделі оптико-електронного вимірювального перетворювача .....	29
РОЗДІЛ 3 РОЗРОБКА ЗАСОБУ ВИМІРЮВАЛЬНОГО КОНТРОЛЮ МАСОВИХ ЧАСТОК КОМПОНЕНТІВ СКРАПЛЕНОГО НАФТОВОГО ГАЗУ.....	51
3.1 Розробка засобу вимірювального контролю компонентів масових часток скрапленого нафтового газу.....	51
3.2 Перетворення та обробка вимірювальної інформації. Виведення функції перетворення засобу вимірювального контролю масових часток компонентів скрапленого нафтового газу.....	53

3.3 Аналіз статичних метрологічних характеристик вимірювального каналу засобу контролю масових часток компонентів скрапленого нафтового газу .....	61
3.4 Аналіз похибок засобу вимірювального контролю масових часток компонентів скрапленого нафтового газу.....	67
3.4.1 Похибка встановлення положення плями світла на фотоприймачі.....	69
3.4.2 Похибка квантування (похибка АЦП) .....	70
3.4.3 Випадкові фактори впливу на сумарну похибку вимірювання масових часток компонентів скрапленого нафтового газу.....	72
<b>РОЗДІЛ 4 АПАРАТНО-ПРОГРАМНА РЕАЛІЗАЦІЯ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАСОБУ ВИМІРЮВАЛЬНОГО КОНТРОЛЮ МАСОВИХ ЧАСТОК КОМПОНЕНТІВ СКРАПЛЕНОГО НАФТОВОГО ГАЗУ .....</b>	
4.1 Рекомендації щодо інженерного проектування засобу вимірювального контролю масових часток компонентів скрапленого нафтового газу.....	74
4.2 Алгоритм вимірювального контролю масових часток компонентів скрапленого нафтового газу.....	78
4.3 Розробка конструкції засобу вимірювального контролю масових часток компонентів скрапленого нафтового газу.....	81
4.4 Експериментальні дослідження засобу вимірювального контролю масових часток компонентів скрапленого нафтового газу.....	85
4.5 Експериментальні дослідження похибок засобу вимірювального контролю масових часток компонентів скрапленого нафтового газу.....	90
4.6 Оцінювання загальної похибки вимірювання масової частки компонентів скрапленого нафтового газу.....	95
4.7 Оцінювання вірогідності вимірювального контролю масових часток компонентів скрапленого нафтового газу...	97
<b>СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ.....</b>	<b>101</b>

## ВСТУП

На сьогодні знаходить широке використання скраплений нафтовий газ як паливо в двигунах автомобільного транспорту та установках муніципальних, промислових і сільськогосподарських об'єктів [1]. При цьому спостерігається неперервне зростання об'ємів споживання цього виду палива, як наслідок постає задача підвищення його якості. Одним із шляхів її вирішення є контроль масових часток компонентів скрапленого нафтового газу, оскільки різні масові та об'ємні співвідношення його складових спричиняють зміну основних характеристик скрапленого нафтового газу, зокрема, тепловіддачі, складу викидів після згорання тощо.

Відомими методами вимірювального контролю масових часток компонентів скрапленого нафтового газу є хроматографічний, хімічний, радіохвильовий, радіочастотний, піролізу, гідростатичного зважування, випаровування та охолодження [2–4]. Основними їх недоліками є складність реалізації процесу вимірювання, його висока вартість та низька точність. Наприклад, похибка методу гідростатичного зважування складає 5 % [5, 6], піролізу – 5...10 % [7], радіохвильового та радіочастотного – 4 % [8]. Це пов'язано з визначенням співвідношення лише суміші пропан-бутан, тоді як наявність ненасичених вуглеводнів не враховується.

На основі проведеного аналізу особливостей компонентного складу скрапленого нафтового газу встановлено, що на сьогодні існують декілька марок скрапленого нафтового газу, залежно від основних його компонентів. Наприклад, в пропан-бутані автомобільному частка пропану може коливатись в діапазоні від 40 % до 60 %, бутану – від 34 % до 60 %, ненасичених вуглеводнів – від 0 % до 6 % [9, 10]. Вихід масової частки хоча б одного з компонентів скрапленого нафтового газу за межі зазначених діапазонів відображається на його якості. Це в кінцевому результаті веде до значних економічних збитків. Тому вимірювальний контроль масових часток компонентів скрапленого нафтового газу надзвичайно важливий, оскільки нормоване співвідношення масової частки кожного із компонентів визначає не лише марку, але й якість скрапленого нафтового газу [11–16].

Таким чином, з огляду на безупинний розвиток промисловості та високі вимоги щодо якості газу в стандартах [5, 7, 9, 10, 17–21], а, відповідно, й до вимірювального обладнання, важливим та актуальним постає завдання розробки сучасних методів і засобів вимірювального контролю масових часток компонентів в скрапленого нафтового газу.

**РОЗДІЛ 1**  
**ОГЛЯД ВІДОМИХ МЕТОДІВ І ЗАСОБІВ**  
**ВИМІРЮВАЛЬНОГО КОНТРОЛЮ МАСОВИХ ЧАСТОК**  
**КОМПОНЕНТІВ СКРАПЛЕНОГО НАФТОВОГО ГАЗУ**

Вимірjuвальний контроль масових часток компонентів скрапленого нафтового газу у різних галузях науки та техніки передбачає використання різноманітних методів та засобів вимірjuвального контролю, вибір яких визначається особливостями кожного конкретного місця застосування [22–44].

**1.1 Аналіз фізико-хімічних показників**  
**скрапленого нафтового газу**

На сьогодні знаходить широке використання скраплений нафтовий газ як паливо в двигунах автомобільного транспорту, так і в установках муніципальних, промислових і сільськогосподарських об'єктів [1]. Скраплений нафтовий газ – це суміш хімічних сполук, що складається в основному з водню і вуглецю з різною структурою молекул, тобто суміш вуглеводнів різної молекулярної маси [45–50], а саме: пропану ( $C_3H_8$ ), бутану ( $C_4H_{10}$ ) та ненасичених вуглеводнів [7].

Основна перевага скрапленого нафтового газу – можливість існування при температурі навколишнього середовища і помірних тисках як у рідкому, так і в газоподібному стані. У рідкому стані він легко переробляється, зберігається і транспортується, в газоподібному має кращу характеристику згоряння.

Серед особливостей, які ускладнюють використання скрапленого нафтового газу в промисловості, варто зазначити такі:

1. Нелінійна залежність густини як рідкої, так і парової фаз скрапленого нафтового газу від температури і компонентного складу пропану та бутану (рис. 1.1) при сталому тиску [9, 17].

2. Фазові переходи при зміні температури, тиску або кількості скрапленого нафтового газу (випаровування, кипіння, конденсація).

3. Висока густина пари.

4. Широкий діапазон тиску в робочому діапазоні температур (від 0,07 до 1,6 МПа).

5. Схильність до утворення снігових, крижаних і кристалогідратних відкладень [51].

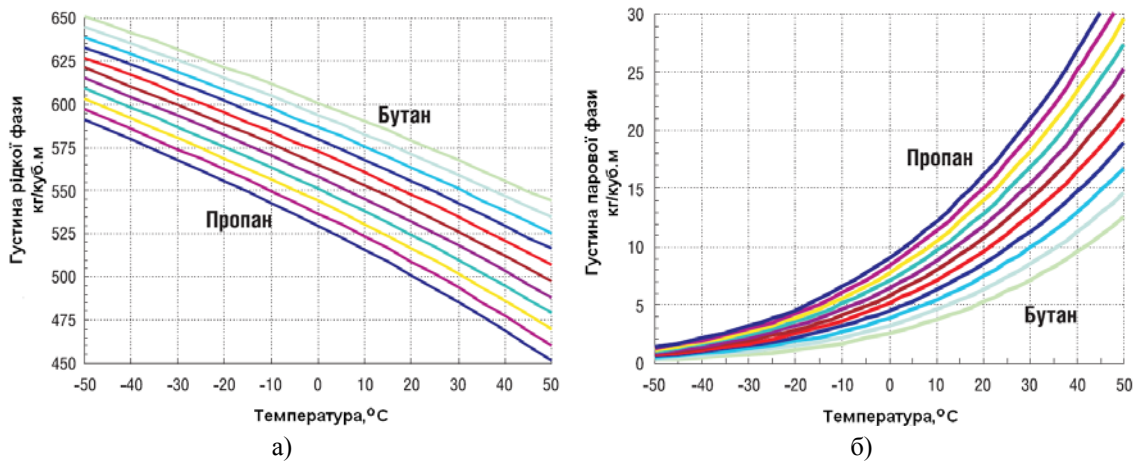


Рисунок 1.1 – Залежність густини рідкої (а) та парової (б) фаз скрапленого нафтового газу від температури і компонентного складу пропану та бутану

Стан вуглеводневих систем визначається сукупністю впливів різних факторів, тому для повної характеристики необхідно знати всі параметри. До основних параметрів, що піддаються безпосередньому вимірюванню і впливають на скраплений нафтовий газ, відносять масу рідкої та парової фаз скрапленого нафтового газу, загальна масу скрапленого нафтового газу, густину, тиск, температуру, в'язкість, масові частки компонентів, співвідношення фаз тощо [15]. Також важливо враховувати процеси, які істотно впливають на контроль скрапленого нафтового газу, це: залежність об'єму рідкої фази від параметрів стану та складу скрапленого нафтового газу, проблема системи «рідина–пар», спотворення показів сенсорів при зміні температури, тиску чи складу скрапленого нафтового газу, розчинена вода в рідкій та паровій фазі скрапленого нафтового газу [2–4, 47].

## 1.2 Аналіз відомих методів і засобів вимірювального контролю масових часток компонентів скрапленого нафтового газу

Повноцінний моніторинг скрапленого нафтового газу як галузі промисловості передбачає проведення експертно-аналітичного контролю, наприклад як в [22, 44], результат якого дає уявлення про осно-

вні компоненти скрапленого нафтового газу – вільна вода, луг, сірка, метанол, пропан-бутан та методи їх контролю.

Стандартні методи вимірювального контролю масових часток компонентів скрапленого нафтового газу затверджені ASTM (Американська Спільнота з Випробовування Матеріалів) та UOP (Universal Oil Products), які в даний час широко використовуються нарівні з стандартами EN (Стандарти Західної Європи), EN ISO (Міжнародна Організація зі Стандартизації), ГОСТ [5, 7, 9, 17 – 21], ДСТУ [10], згідно з якими проводять огляд характеристик цих методів.

На рисунку 1.2 наведено основні методи вимірювального контролю масових часток компонентів скрапленого нафтового газу згідно з вітчизняними і міжнародними стандартами, а саме: хроматографічний, хімічний методи, методи піролізу, гідростатичного зважування, випаровування та охолодження [6, 52–57].



Рисунок 1.2 – Основні методи вимірювального контролю масових часток компонентів скрапленого нафтового газу

Найпростішим методом вимірювального контролю масових часток компонентів скрапленого нафтового газу з використанням їх густин є метод гідростатичного зважування, що передбачає використання зразкового мірника і ваг. При використанні ваг з похибкою  $\pm 50$  г і 10-літрового мірника з похибкою  $\pm 0,01$  л (чи менше) похибка розра-



хунку густини, на основі якої розраховуються масові частки компонентів суміші скрапленого нафтового газу, складає близько  $\pm 5\%$ . Процес вимірювання не піддається повній автоматизації і практично не захищений від людського фактора [45].

Також визначення складу пропану, бутану та ненасичених вуглеводнів виконують за допомогою хроматографічного методу, заснованого на розділенні компонентів у газоадсорбційній і / або газорідній варіантах хроматографії. Для вимірювання молярної частки компонентів скрапленого нафтового газу використовують апаратнопрограмні хроматографічні комплекси (АПХК) на базі лабораторних або потокових хроматографів. Величиною, що вимірюється, є молярна частка компонентів в пробі скрапленого нафтового газу. Значення масової частки компонентів в пробі скрапленого нафтового газу встановлюють шляхом перерахунку виміряних значень молярної частки. Залежно від вимог до аналізу компонентного складу скрапленого нафтового газу використовують один з таких методів:

- метод А – для аналізу вуглеводневого складу скрапленого нафтового газу, включаючи граничні і ненасичені вуглеводні з довжиною вуглецевого ланцюжка С1-С6;
- метод Б – для аналізу граничних вуглеводнів з довжиною вуглецевого ланцюжка С1-С6 і метанолу у складі скрапленого нафтового газу.

Метод А застосовують для визначення повного вуглеводневого складу скрапленого нафтового газу, включаючи граничні вуглеводні, ненасичені вуглеводні з одним або з двома подвійними зв'язками. Метод може бути реалізований при використанні хроматографічних колонок, що забезпечують задовільне розділення проби скрапленого нафтового газу на індивідуальні компоненти.

Метод Б використовують для визначення метанолу в пробах скрапленого нафтового газу. Метод застосовують також для визначення компонентного складу скрапленого нафтового газу, що не містить ненасичених вуглеводнів, або в тих випадках, коли наявність ненасичених вуглеводнів у складі скрапленого нафтового газу не нормовано.

При обробці хроматографічної інформації значення молярної частки компонентів визначають з використанням відносних молярних коефіцієнтів чутливості (метод внутрішньої нормалізації) або градуую-

вальних коефіцієнтів (метод абсолютного градування) з наступною нормалізацією отриманих значень. Визначення метанолу проводять тільки з використанням градувального коефіцієнта. У разі визначення молярної частки важких компонентів використовують коефіцієнти, встановлені для граничних вуглеводнів нормальної будови з відповідним числом атомів вуглецю. Сума вимірних ненормалізованих значень молярної частки компонентів проби скрапленого нафтового газу не повинна відрізнятись від 100 % більше ніж на 2 %, при цьому повинні бути враховані всі компоненти, молярна частка яких перевищує 0,01 % [34].

Основним недоліком хроматографічного методу є необхідність застосування дорогих стандартних зразків, що збільшує вартість аналізу [51].

Наявність вільної води [58, 59] та лугу в скрапленому нафтовому газі визначається за допомогою методу випаровування, коли після випаровування газу вільна вода та луг залишаються на дні і на стінках відстійника. При утрудненні візуальної ідентифікації вільної води та лугу у рідкому залишку їх наявність визначають за допомогою барвника. Похибка методу складає 1 % [7].

Для додаткової ідентифікації вільної води використовують метод охолодження, за яким рідкий залишок охолоджують до температури  $-5...-10^{\circ}\text{C}$ . Якщо у відстійнику утворюється лід, то констатують наявність вільної води, якщо рідина не замерзає – вільна вода відсутня. Похибка методу складає 1 % [7].

Суть вимірювання кількості сірки полягає в методі піролізу – спалюванні за допомогою спеціального пальника скрапленого газу в присутності повітря до двоокису сірки з наступним окисненням останньої розчином перекису водню і титруванням сірчаної кислоти, що утворилася, лугом в присутності змішаного індикатора.

Також вимірювання проводять хімічним методом за допомогою впливу на мідну пластинку активних сірчаних з'єднань чи вільної сірки, яка міститься в скрапленому газі, в умовах встановлених стандартом. Похибка методу складає 1 % [7, 22].

З урахуванням вищезазначених методів, існує більше 40 різновидів засобів вимірального контролю масових часток компонентів скрапленого нафтового газу, які застосовуються в промисловості

(електричні та оптичні сенсори, хроматографи). Причому тенденція розвитку ринку засобів вимірювального контролю для рідин диктує нові, більш високі вимоги до точності, матеріалів, що використовуються, методів відображення інформації тощо. З'явилась необхідність враховувати параметри, які раніше або взагалі не враховувалися, або вимірювання проводилося без застосування сенсорів контролю середовища внаслідок його агресивності або нестабільного стану [60].

На рис. 1.3 наведено основні засоби вимірювального контролю масових часток компонентів скрапленого нафтового газу.

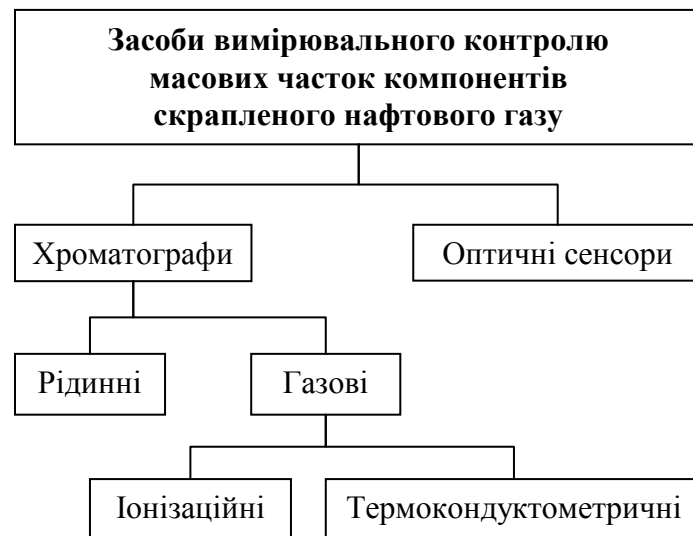


Рисунок 1.3 – Основні засоби вимірювального контролю масових часток компонентів скрапленого нафтового газу

Сьогодні випускається велика кількість хроматографів, які виготовляють фірми Agilent, Dani, Perkin Elmer, Shimadzu, НВФ «МетаХром», «Хіманалітсервіс», ЗАТ «Хроматек», ВАТ «Колір» тощо, які відповідають таким вимогами:

- точність дозування і відтворюваність умов введення аналізованої проби, яке досягається застосуванням автоматичних дозаторів рідин і газів;
- відсутність фракціонування, розкладання і адсорбції у пристрої введення (випарнику);
- відтворюваність і висока точність підтримки умов хроматографічного аналізу, в тому числі температури термостата (особливо при

програмуванні) і витрати газу-носія для хроматографічної (у більшості випадків капілярної) колонки;

- висока точність алгоритмів виявлення та розмітки хроматографічних піків, в тому числі визначення вершини піка (час утримування масової частки компонента) і розрахунок площі піка (кількісне визначення масової частки компонента);

- висока точність приготування градуювальних розчинів (сумішей), а також вибір необхідного числа точок і математичної залежності при побудові градуювальної характеристики [15].

Відповідно з агрегатним станом рухомої фази існують газові та рідинні хроматографи. У переважній кількості хроматографів реалізується варіант проявника хроматографії. У газовому хроматографі газ-носії з балона через регулятори витрат і тиску неперервно з постійною або змінною швидкістю подається в хроматографічну колонку-трубку (діаметром 2–5 мм і довжиною 1–10 м), заповнену сорбентом і поміщену в термостат, що дозволяє підтримувати задану температуру (до 500 °С). Введення газоподібної проби (1–50 см<sup>3</sup>) і рідкої (кілька мкл) здійснюється або вручну (газовим шприцем або мікروشприцем), або автоматично – за допомогою мікродозаторів. У хроматографічній колонці відбувається розділення вихідної багатокомпонентної суміші на ряд бінарних сумішей, що складаються з газу-носія і одного з аналізованих компонентів. Бінарні суміші в певній послідовності, яка залежить від сорбованості компонентів, надходять в детектор. У результаті процесів (зміни теплопровідності, іонізаційного струму тощо), що відбуваються в детекторі, фіксується зміна концентрації.

Найбільш поширені типи газових хроматографів – термокондуктометричні та іонізаційні. Прикладом перших є детектор з теплопровідності (катарометр), в мостове коло якого введені дві комірки для вимірювання теплопровідності; через них протікають потоки чистого газу-носія і бінарна суміш. Теплопровідність інших відрізняється від теплопровідності чистого газу-носія, тому при проходженні бінарної суміші через чутливий елемент детектора – нагріту спіраль з опором 10–80 Ом – змінюються температура і опір спіралі залежно від концентрації компонента. Головною частиною іонізаційних детекторів є іонізаційна камера, де відбувається іонізація молекул, що потрапляють в неї з потоком газу-носія з хроматографічної колонки. Іонізацію ре-

човин, що досліджуються, здійснюють в полум'ї водню, метастабільними атомами аргону або гелію, повільними електронами тощо. Іони під впливом прикладеної напруги переміщуються в іонізаційній камері, що приводить до утворення електричного струму. Термокондуктометричні та іонізаційні детектори характеризуються чутливістю (мінімально визначувана концентрація речовини), селективністю (здатність вибірково визначати в суміші окремі компоненти), прямою залежністю сигналу від концентрації. У рідинному хроматографі використовують проточний рефрактометр, що включається за диференціальною схемою, або детектор поглинання в ультрафіолетовій області. Подачу рухомої фази – розчинника здійснюють за допомогою беспульсаційних систем (тиск до  $50 \text{ МН/м}^2$  або  $500 \text{ кгс/см}^2$ ), а введення проби – мікрошприцем або перемиканням крану. Довжина хроматографічної колонки в рідинному хроматографі не перевищує 1 м. В цілому детектори рідинних хроматографів мають істотно меншу чутливість (приблизно на 2 порядки), ніж детектори газових хроматографів. Для точного вимірювання концентрацій речовин детектори калібрують сумішами відомого складу [60].

Оптичні сенсори концентрації скрапленого нафтового газу широко представлені на ринку засобів вимірювального контролю [11–15].

Оптичні сенсори визначення масових часток компонентів скрапленого нафтового газу використовуються для його контролю в ємностях. Вони приєднані до системи генерування електромагнітного сигналу, прийому та обробки прийнятого від сенсора сигналу та розташовані вертикально в ємності. Довжина сенсора відповідає висоті ємності, причому сенсор виконано у вигляді хвилеводу, що має неоднорідність, розташовану від початку хвилеводу на відстані, яка забезпечує знаходження цієї неоднорідності в області, зайнятій газовою фазою. Оптичний сенсор концентрації скрапленого нафтового газу, що містить оптично зв'язані два джерела інфрачервоного випромінювання з довжинами хвиль випромінювання в максимумах, що збігаються з максимумом смуги власного поглинання аналізованого газу; приймач інфрачервоного випромінювання, вхідного і вихідного газових патрубків, причому патрубки робочої кювети мають однакові або різні діаметри отворів; джерело інфрачервоного випромінювання, розміщене на одній осі з приймачем робочої кювети з вхідним і вихідним

газовими патрубками, який відрізняється тим, що робоча кювета містить кювету з опорним газом, на поверхні якої розташована діафрагма, а друге джерело інфрачервоного випромінювання опорного каналу та другий приймач інфрачервоного випромінювання опорного каналу, розташовані на одній осі з різних сторін кювети з опорним газом, біля яких розташовані вхідні і вихідні оптичні системи, виходи приймачів інфрачервоного випромінювання і входи джерел інфрачервоного випромінювання обох кювет з'єднані з мікропроцесором [27–29, 61–65]. Оптичний сенсор дозволяє проводити точні і швидкі заміри густини, співвідношення компонентів і температури, потребує малого необхідного об'єму проби, дозволяє автоматичний перерахунок наведеної густини, містить автоматичну температурну поправку, зручний в експлуатації. Також сенсор дозволяє проводити розрахунки наведеної густини і масової частки пропану і бутану у відсотках в скрапленому нафтовому газі. Призначений для дослідження зразків скрапленого газу в лабораторних або польових умовах. Повністю автоматизований процес вимірювання дозволяє оперативно отримати необхідні дані про густину, співвідношення компонентів і температуру. Отримані результати вимірювань густини, співвідношення компонентів і температури перетворюються в наведені значення при 15 °С і 20 °С. Діапазон вимірювання температури складає –30...+50 °С, а густини – 475...700 кг/м<sup>3</sup>, абсолютна похибка вимірювання температури – 0,2 °С, а густини – 0,5 кг/м<sup>3</sup> [66]. Оптичний сенсор концентрації скрапленого нафтового газу складається з блока керування, джерел інфрачервоного випромінювання, вимірювальної кювети, приймача інфрачервоного випромінювання, кювети з чистим повітрям та кювети з чистою домішкою, діафрагм, вхідних і вихідних оптичних систем, підсилювачів, комутатора, АЦП, мікропроцесора, цифрового індикаторного табло [30, 31, 67, 68].

### **1.3 Вибір критерію оцінки ефективності вимірювальних перетворювачів**

При порівнянні вимірювальних перетворювачів постає суттєвою проблема вибору оптимального типу перетворювача. Ефективність пристрою є комплексним показником і проявляється в процесі вико-

ристання пристрою за функціональним призначенням. Це можна проілюструвати у вигляді критерію «ефективність – вартість» [69]:

$$K_e = (K_y, K_g), \quad (1.1)$$

де  $K_y$  – показник, який характеризує якість засобу вимірювального контролю масових часток компонентів скрапленого нафтового газу;  $K_g$  – показник, що характеризує інтегровані витрати при реалізації засобу вимірювального контролю.

При цьому задача оптимізації в загальному вигляді полягає в тому, щоб знайти засіб ( $S$ ) серед множини допустимих варіантів ( $S_{dop}$ ), який має найбільше значення  $K_e$ . При цьому правило оптимальності

$$K_{e_{opt}} = \inf_{S \in S_{dop}} K_e. \quad (1.2)$$

Для розв’язання такої задачі необхідно багатокритеріальну задачу звести до однокритеріальної. В загальному випадку показники  $K_y$  і  $K_g$  залежать від способу вимірювання та принципу його реалізації. В даному випадку показники критерію оптимальності засобу, що розробляється, можна описати у вигляді

$$K_e = \|M_i, G_i, Y_i\|, \quad (1.3)$$

де  $M_i$  – показник якості вимірювального перетворювача при реалізації  $i$ -го варіанта;  $G_i$  – фінансові витрати на реалізацію  $i$ -го варіанта;  $Y_i$  – затрати часу при реалізації  $i$ -го варіанта вимірювального перетворювача конкретним способом.

Показником якості вимірювального перетворювача може бути дисперсія результату, в той час як  $G_i$  і  $Y_i$  визначають інтегровані затрати. На основі [68, 69] запишемо критерій ефективності у вигляді функціональної залежності виду:

$$K_e(x, a) = x + \varepsilon + e^{-ax}, \quad (1.4)$$

де  $x = \delta_{\text{дон}} / \delta$ ;  $\varepsilon$  – вірогідність вимірювального контролю;  $a$  – коефіцієнт, що враховує фінансові затрати (в даному випадку вартість);  $\delta$  – відносна похибка вимірювання;  $\delta_{\text{дон}}$  – допустима відносна похибка вимірювання.

Результати порівняльної оцінки ефективності вимірювальних перетворювачів наведені в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 – Порівняльна характеристика вимірювальних перетворювачів

Вимірювальний перетворювач	$a$ , грн.	$\delta$ , %	$\delta_{\text{дон}}$ , %	$\varepsilon$	$x$	$K_e$
Потенційний	15 тис.	$\pm 1$	$\pm 1$	1	1	2
Оптико-електронного типу	12 тис.	$\pm 2$	$\pm 1$	0,97	0,5	1,47
Система непрямих статичних вимірювань «Струна»	78 тис.	$\pm 4$	$\pm 1$	0,87	0,4	1,27
Резонансного типу	50 тис.	$\pm 3$	$\pm 1$	0,85	0,3	1,15

За результатами проведеного аналізу встановлено перспективність вимірювальних перетворювачів оптико-електронного типу, вірогідність яких становить 0,97, що на 10 % більше в порівнянні з аналогами. Таким чином напрямком подальших досліджень є розробка оптико-електронного засобу вимірювального контролю масових часток компонентів скрапленого нафтового газу [70].



## **РОЗДІЛ 2**

### **РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ ВИМІРЮВАЛЬНОГО КОНТРОЛЮ МАСОВИХ ЧАСТОК КОМПОНЕНТІВ СКРАПЛЕНОГО НАФТОВОГО ГАЗУ**

Скраплений нафтовий газ набув поширення в багатьох галузях промисловості та господарства. Для того, щоб задовольнити вимоги якості, які пред'являються до нього, потрібно дотримуватись вимог та норм щодо фізико-хімічних та експлуатаційних показників скрапленого газу. До них відносяться: масова частка компонентів, об'ємна частка рідкого залишку [71], тиск насичених парів, масова частка сірки, наявність вільної води та луку. Дотримання зазначених вище норм та компонентного складу скрапленого нафтового газу дозволить постачати кінцевим користувачам якісний продукт [9].

#### **2.1 Аналіз експлуатаційних показників скрапленого нафтового газу та його контроль**

Скраплений нафтовий газ при транспортуванні та зберіганні представляє собою двофазну систему, в якій постійно змінює свій агрегатний стан, тобто частина газу випаровується і переходить в газоподібний стан, а частина конденсується, переходячи в рідкий стан. У тих випадках, коли кількість рідини, що випарувалась, дорівнює кількості сконденсованого пару, система рідина–газ досягає рівноваги і пари над рідиною стають насиченими, а їх тиск називається тиском насичення або пружністю парів.

Пружність парів скрапленого нафтового газу зростає з підвищенням температури і зменшується з її пониженням. Це властивість скраплених газів є одним з визначальних при проектуванні систем зберігання і розподілу. При відборі з резервуарів киплячої рідини і транспортуванні її по трубопроводу частина рідини випаровується через втрати тиску, утворюється двофазний потік, пружність парів якого залежить від температури потоку, яка нижче температури в резервуарі. У разі припинення руху двофазної рідини по трубопроводу тиск у всіх точках вирівнюється і стає рівним пружності парів.

Скраплені вуглеводневі гази транспортуються в залізничних і автомобільних цистернах, зберігаються в резервуарах різного об'єму в стані насичення, причому фазний стан скрапленого газу має вигляд, зображений на рисунку 2.1.

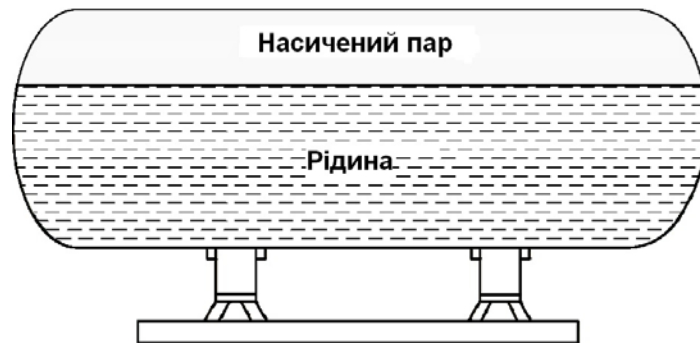


Рисунок 2.1 – Фазний стан скрапленого газу при зберіганні та транспортуванні

Як видно з рисунку 2.1, у нижній частині цистерни розміщується кипляча рідина, а у верхній знаходиться сухий насичений пар. При зниженні температури в резервуарах частина пару сконденсується, тобто збільшиться маса рідини і зменшиться маса пару, настане новий рівноважний стан. При підвищенні температури відбувається зворотний процес, поки при новій температурі не настане рівновага фаз.

Таким чином, в резервуарах і трубопроводах відбуваються процеси випаровування та конденсації, які в двофазних середовищах протікають при постійному тиску і температурі, при цьому температури випаровування і конденсації рівні [46].

Скраплений нафтовий газ, як зазначалось вище, використовується в якості палива для комунально-побутового споживання, моторного палива для автомобільного транспорту, а також в промислових цілях. Залежно від основного компонента виділяють марки скрапленого нафтового газу, які наведені в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Марки скрапленого нафтового газу

Марка	Найменування
ПТ	Пропан технічний
ПА	Пропан автомобільний
ПБА	Пропан-бутан автомобільний
ПБТ	Пропан-бутан технічний
БТ	Бутан технічний

В помірному кліматичному районі [48] в літній період (не нижче  $-20^{\circ}\text{C}$ ) як паливо для автомобільного транспорту використовується скраплений нафтовий газ марки ПБА та ПБТ, а в зимовий – ПА та ПТ.

Масові частки компонентів різних марок скрапленого нафтового газу відрізняються. Частка пропану для ПБА може коливатись в діапазоні від 40 % до 60 %, бутану – 34...60 %, ненасичених вуглеводнів – 0...6 % [9, 10].

Таким чином, вимірювальний контроль масових часток компонентів скрапленого нафтового газу надзвичайно важливий, оскільки нормоване співвідношення масової частки кожного із компонентів визначає не лише марку, але й якість скрапленого нафтового газу [25, 26].

## 2.2 Розробка математичної моделі стану рідкої фази скрапленого нафтового газу

На відміну від більшості рідин, які при зміні температури змінюють об'єм несуттєво, рідка фаза скрапленого нафтового газу досить різко збільшує свій об'єм при підвищенні температури (в 16 разів більше, ніж вода). Тому при заповненні резервуарів і балонів доводиться враховувати можливе збільшення об'єму рідини [19].

Рідка фаза скрапленого нафтового газу при тиску в 1,6 МПа є системою компонентів, яка схематично показана на рис. 2.2.

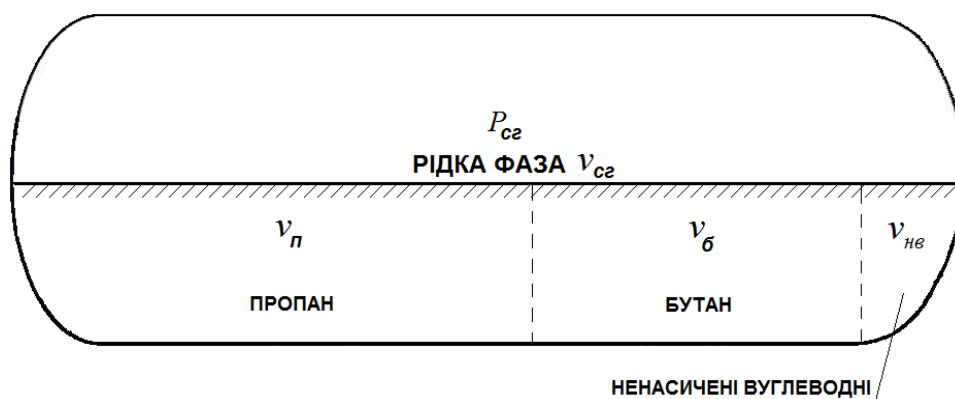


Рисунок 2.2 – Система компонентів рідкої фази скрапленого нафтового газу:

$P_{c2}$  – тиск скрапленого нафтового газу;  $v_{c2}$  – питомий об'єм скрапленого нафтового газу;  $v_p$  – питомий об'єм пропану,  $v_b$  – питомий об'єм бутану;

$v_{нв}$  – питомий об'єм ненасичених вуглеводнів

Об'єм скрапленого нафтового газу має певне значення маси, яке характеризується питомим об'ємом. Тобто  $v = \frac{V}{m}$  – питомий об'єм, де  $V$  – об'єм,  $m$  – маса. Значення питомого об'єму обернено пропорційне значенню густини –  $v = \frac{1}{\rho}$ .

Залежність питомого об'єму рідкої фази від температури [45] в загальному вигляді описується виразом

$$v = v_0(1 + \alpha(T - T_0)), \quad (2.1)$$

де  $v_0$  – питомий об'єм рідкої фази при температурі  $T_0$ , яка складає 293 К;  $v$  – питомий об'єм рідкої фази при температурі  $T$ ;  $\alpha$  – коефіцієнт об'ємного розширення, який складає для пропану 0,0026 1/град, а для бутану – 0,0024 1/град [16].

У випадку системи компонентів рідкої фази скрапленого нафтового газу, зображеній на рисунку 2.2, питомий об'єм скрапленого нафтового газу  $v_{c2}$  можна математично описати у вигляді суми питомих об'ємів пропану  $v_n$ , бутану  $v_b$  та ненасичених вуглеводнів  $v_{нв}$ .

$$v_n k_1 + v_b k_2 + v_{нв} k_3 = v_{c2}, \quad (2.2)$$

де  $k_1, k_2, k_3$  – масові частки пропану, бутану та ненасичених вуглеводнів, відповідно.

Тоді з врахуванням взаємозалежності питомого об'єму та густини

$$\frac{k_1}{\rho_n} + \frac{k_2}{\rho_b} + \frac{k_3}{\rho_{нв}} = \frac{1}{\rho_{c2}}, \quad (2.3)$$

де  $\rho_n, \rho_b, \rho_{нв}, \rho_{c2}$  – густини пропану, бутану, ненасичених вуглеводнів та скрапленого нафтового газу, відповідно.

Густина скрапленого нафтового газу, а, отже, і його компонентів – пропану, бутану та ненасичених вуглеводнів, характеризується нелінійною залежністю від температури (див. рис. 1.1). Тобто при зміні температури на 1 °С густина змінюється для пропану, бутану та нена-

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Рачевский Б. С. Сжиженные углеводородные газы / Б. С. Рачевский. – М. : Нефть и газ, 2009. – 640 с.
2. Sovlukov A. S. Measurement of liquefied petroleum gas quantity in a tank by radiofrequency techniques / A. S. Sovlukov, V. I. Tereshin // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. – 2004. – V. 53, No. 4. – P. 1255–1261.
3. Nyfors E. Industrial microwave sensors / E. Nyfors, P. Vainikainen. – Artech House. – 1989. – 351 p.
4. Совлуков А. С. Радиочастотный метод измерения количественных параметров сжиженных углеводородных газов в резервуарах / А. С. Совлуков, В. И. Терешин // Измерительная техника. – 2005. – № 10. – С. 68–71.
5. Газы углеводородные сжиженные. Методы определения углеводородного состава : ГОСТ Р 54484-2011. – М. : Стандартиформ РФ, 2011. – 28 с.
6. Чертков Я. Б. Современные и перспективные углеводородные реактивные и дизельные топлива / Я. Б. Чертков. – М. : Химия, 1968. – 352 с.
7. Газы углеводородные сжиженные, поставляемые на экспорт. Технические условия : ГОСТ 21443-75. – М. : Миннефтехимпром СССР, 1975. – 13 с.
8. Совлуков А. С. Радиочастотные технологические измерения при хранении и транспортировании сжиженных углеводородных газов / А. С. Совлуков, В. И. Терешин // Технические и программные средства систем управления, контроля и измерения (УКИ-10) : материалы II Международной конференции. – Москва, 2010. – 11 с.
9. Газы углеводородные сжиженные топливные. Технические условия : ГОСТ Р 52087-03. – М. : Миннефтехимпром РФ, 2003. – 12 с.
10. Газы вуглеводні скраплені паливні для комунально-побутового споживання. Технічні умови : ДСТУ 4047-01. – К. : Національний стандарт України, 2001. – 13 с.
11. Летуновский А. А. Система автоматизации отпуска сжиженного газа на АГЗС / А. А. Летуновский // Современные технологии автоматизации. – 2002. – № 2. – С. 54–61.

12. Совлуков А. С. Измерение количества сжиженного углеводородного газа в резервуаре / А. С. Совлуков, В. И. Терешин // Измерительная техника. – 2006. – № 2. – С. 40–42.
13. Викторов В. А. Высокочастотный метод измерения неэлектрических величин / В. А. Викторов, Б. В. Лункин, А. С. Совлуков. – М. : Наука, 1980. – 640 с.
14. Терешин В. И. Особенности учета СУГ в резервуарном парке / В. И. Терешин, А. С. Совлуков, А. А. Летуновский // Газ России. – 2007. – № 2. – С. 66–71.
15. Астахов А. Анализ нефтепродуктов с помощью хроматографических методов / А. Астахов // Оборудование и материалы. – 2013. – № 3. – С. 48–53.
16. Преображенский Н. И. Сжиженные углеводородные газы / Н. И. Преображенский. – Л. : Недра, 1975. – 279 с.
17. Газы углеводородные сжиженные. Расчетный метод определения плотности и давления насыщенных паров : ГОСТ 28656-90. – М. : Миннефтехимпром СССР, 1990. – 10 с.
18. Газы углеводородные сжиженные топливные для коммунально-бытового потребления. Технические условия : ГОСТ 20448-90. – М. : Миннефтехимпром СССР, 1990. – 8 с.
19. Газы углеводородные сжиженные для автомобильного транспорта. Технические условия : ГОСТ 27578-87. – М. : Миннефтехимпром СССР, 1987. – 10 с.
20. Газы углеводородные сжиженные. Метод определения сероводорода и меркаптановой серы : ГОСТ 22985-90. – М. : Миннефтехимпром СССР, 1990. – 14 с.
21. Газы углеводородные сжиженные. Метод определения углеводородного состава : ГОСТ 10679-76. – М. : Миннефтехимпром СССР, 1976. – 9 с.
22. Білінський Й. Й. Порівняльна характеристика методів експертно-аналітичного контролю якості скрапленого нафтового газу / Й. Й. Білінський, Б. П. Книш // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2014. – № 5. – С. 142–147.
23. Білінський Й. Й. Класифікація оптичних методів дослідження фізико-хімічних параметрів газу / Й. Й. Білінський, Б. П. Книш, В. В. Онушко // Вимірювання та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2011. – № 2. – С. 52–56.

24. Білинський Й. Й. Універсальна класифікація оптичних методів дослідження густини газу / Й. Й. Білинський, Б. П. Книш, В. В. Онушко // Вісник Хмельницького національного університету. – 2010. – № 4. – С. 23–26.

25. Білинський Й. Й. Визначення кількісного вмісту компонентів скрапленого нафтового газу / Й. Й. Білинський, Б. П. Книш, М. В. Гладишевський // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2014. – № 1. – С. 112–119.

26. Білинський Й. Й. Контроль кількісного вмісту компонентів зрідженого нафтового газу / Й. Й. Білинський, Б. П. Книш, В. Р. Гладишевський // Вісник Київського національного університету технологій та дизайну. – 2013. – № 3. – С. 18–20.

27. Білинський Й. Й. Методика визначення коефіцієнтів поглинання складових вологого природного газу / Й. Й. Білинський, Б. П. Книш, В. В. Онушко // Збірник наукових праць Вінницького національного аграрного університету. – 2011. – № 9. – С. 134–139.

28. Білинський Й. Й. Інфрачервоний двохвильовий сенсор контролю концентрації газу / Й. Й. Білинський, Б. П. Книш, О. А. Павлюк // Наукові праці ВНТУ. – 2011. – № 3. – 6 с. – Режим доступу: <http://praci.vntu.edu.ua/index.php/praci/article/view/290/288>.

29. Пат. 61667 УКРАЇНА, МКІ G0121/81. Оптичний сенсор концентрації газу / Білинський Й. Й., Книш Б. П., Гладишевський В. Р. – № 201100013 ; заявл. 04.01.2011 ; опубл. 25.07.2011, Бюл. № 14. – 3 с.

30. Білинський Й. Й. Інфрачервоний триканальний сенсор концентрації газу / Й. Й. Білинський, К. Ю. Іоніна, Б. П. Книш // Вісник Хмельницького національного університету. – 2011. – № 6. – С. 41–49.

31. Пат. 68725 УКРАЇНА, МКІ G0121/81. Оптичний сенсор концентрації газу / Білинський Й. Й., Книш Б. П. – № 201110898 ; заявл. 12.09.2011 ; опубл. 10.04.2012, Бюл. № 7. – 5 с.

32. Двоканальний аналізатор вологості газу та дослідження його статичних метрологічних характеристик / Й. Й. Білинський, Б. П. Книш, В. В. Онушко, О. С. Городецька // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2011. – № 3. – С. 222–228.

33. Білинський Й. Й. Світловодний аналізатор вологості газу / Й. Й. Білинський, К. Ю. Іоніна, Б. П. Книш // Методи та прилади контролю якості. – 2011. – № 27. – С. 44–47.

34. Білинський Й. Й. Експериментальне дослідження аналізатора вологості природного газу / Й. Й. Білинський, Б. П. Книш,

В. В. Онушко, О. С. Городецька // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2013. – № 1. – С. 128–132.

35. Пат. 86552 УКРАЇНА, МКІ G0121/81. Пристрій для визначення об'єму зрідженого газу / Білинський Й. Й., Книш Б. П. – № 201304700 ; заявл. 15.04.2013 ; опубл. 10.01.2014, Бюл. № 1. – 5 с.

36. Пат. 92293 УКРАЇНА, МКІ G0121/81. Спосіб визначення кількісного вмісту компонентів рідкої фази скрапленого нафтового газу / Білинський Й. Й., Книш Б. П. – № 201402378 ; заявл. 07.03.2014 ; опубл. 11.08.2014, Бюл. № 15. – 7 с.

37. Пат. 92294 УКРАЇНА, МКІ G0121/81. Спосіб визначення кількісного вмісту компонентів парової фази скрапленого нафтового газу / Білинський Й. Й., Книш Б. П. – № 201402379 ; заявл. 07.03.2014 ; опубл. 11.08.2014, Бюл. № 15. – 6 с.

38. Білинський Й. Й. Визначення кількісного вмісту компонентів парової фази скрапленого нафтового газу / Й. Й. Білинський, Б. П. Книш // Методи та прилади контролю якості. – 2014. – № 1. – С. 163–167.

39. Білинський Й. Й. Дослідження кількісного вмісту скрапленого газу шляхом використання модельних рідинних систем / Й. Й. Білинський, Б. П. Книш, М. Й. Юкиш // Технологічний аудит і резерви виробництва. – 2014. – № 4/1(18). – С. 23–26.

40. Книш Б. П. Метод контролю кількісного вмісту компонентів скрапленого нафтового газу та засіб для його реалізації / Б. П. Книш // Технологічний аудит та резерви виробництва. – 2014. – № 6/5(20). – С. 34–36.

41. Пат. 100434 УКРАЇНА, МКІ G0121/81. Засіб вимірювального контролю кількісного вмісту скрапленого нафтового газу / Білинський Й. Й., Книш Б. П. – № 201500976 ; заявл. 30.03.2015 ; опубл. 27.07.2015, Бюл. № 14. – 5 с.

42. Білинський Й. Й. Математична модель засобу вимірювального контролю кількісного вмісту скрапленого нафтового газу / Й. Й. Білинський, Б. П. Книш, М. О. Стасюк // Вісник Хмельницького національного університету. – 2015. – № 3. – С. 180–186.

43. Білинський Й. Й. Аналізатор кількісного вмісту скрапленого нафтового газу та дослідження його статичних метрологічних характеристик / Й. Й. Білинський, Б. П. Книш, В. П. Білинська // Вісник Кременчуцького національного університету. – 2015. – № 4. – С. 135–141.



44. Білінський Й. Й. Оптичні методи дослідження фізико-хімічних параметрів газу / Й. Й. Білінський, Б. П. Книш // Радиоелектроніка и молодежь в XXI веке : тези доповідей XVI Міжнародного молодіжного форуму. – Харків, 2012. – С. 329–330.

45. Методы измерения плотности жидкости [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.lemis-baltic.ru/?mid=60>.

46. Свойства сжиженных углеводородных газов. Особенности эксплуатации углеводородных систем [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.avtozagruzka.com/publ3.pdf>.

47. Білінський Й. Й. Вплив води на параметри зрідженого нафтового газу / Б. П. Книш, Й. Й. Білінський // Сучасні проблеми радіотехніки та телекомунікацій «РТ-2013»: тези доповідей 9-ї Міжнар. конф. – Севастополь, 2013. – С. 237.

48. Климат СССР. Районирование и статистические параметры климатических факторов для технических целей : ГОСТ 16350-80. – М. : Миннефтехимпром СССР, 1980. – 102 с.

49. Газохроматографический анализ компонентного состава сжиженного углеводородного газа по новому национальному стандарту ГОСТ Р 54484-2011 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [http://www.chromatec.ru/library/articles/metodicheskie\\_materialy](http://www.chromatec.ru/library/articles/metodicheskie_materialy).

50. Стаскевич Н. Л. Справочник по сжиженным углеводородным газам / Н. Л. Стаскевич, Д. Я. Вигдорчик. – Л. : Недра, 1986. – 543 с.

51. Визначення якості хроматографічними методами [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [http://intranet.tdmu.edu.ua/data/kafedra/internal/pharma\\_2/classes\\_stud/uk/pharm/prov\\_pharm/ptn](http://intranet.tdmu.edu.ua/data/kafedra/internal/pharma_2/classes_stud/uk/pharm/prov_pharm/ptn).

52. Білінський Й. Й. Контроль кількісного вмісту компонентів скрапленого нафтового газу / Й. Й. Білінський, Б. П. Книш // Вимірювання, контроль та діагностика в технічних системах (ВКДТС-2013 : тези доповідей II Міжнар. наук.-техн. конф. – Вінниця, 2013. – С. 186–187.

53. Визначення кількісного вмісту компонентів скрапленого нафтового газу [Електронний ресурс] / Й. Й. Білінський, Б. П. Книш // Підсумки 43-ї регіональної науково-технічної конференції професорсько-викладацького складу, співробітників та студентів університету. – Режим доступу: <http://conf.vntu.edu.ua/allvntu/2014/inrtzp/el.php>.

54. Білінський Й. Й. Методика проведення експериментальних досліджень кількісного вмісту скрапленого нафтового газу на основі термометричного методу / Й. Й. Білінський, Б. П. Книш // Вимірюва-

льна та обчислювальна техніка в технологічних процесах (ВОТТП-13-2014): тези доповідей XIII Міжнар. наук.-техн. конф. – Одеса, 2014. – С. 57.

55. Білінський Й. Й. Методика визначення коефіцієнтів поглинання складових газу / Й. Й. Білінський, Б. П. Книш // Збірник наукових праць SWorld : тези доповідей. – Одеса, 2012. – С. 27–29. –

56. Білінський Й. Й. Експериментальні дослідження з визначення температурної залежності масової частки скрапленого нафтового газу на основі модельних рідинних систем / Й. Й. Білінський, Б. П. Книш // Обчислювальні методи і системи перетворення інформації : тези доповідей III Науково-технічної конференції. – Львів, 2014. – С. 57–58.

57. Білінський Й. Й. Використання модельних рідинних систем для дослідження скрапленого нафтового газу / Й. Й. Білінський, Б. П. Книш // Контроль і управління в складних системах (КУСС-2014) : тези доповідей XII Міжнародна конференція. – Вінниця, 2014. – С. 153.

58. Білінський Й. Й. Аналіз впливу води на параметри зрідженого нафтового газу: [Електронний ресурс] / Й. Й. Білінський, Б. П. Книш // Підсумки 42-ї регіональної науково-технічної конференції професорсько-викладацького складу, співробітників та студентів університету. – Режим доступу: <http://conf.vntu.edu.ua/allvntu/2013/inrtzp/el.php>.

59. Білінський Й. Й. Методика проведення експериментальних досліджень вимірювання вологості природного газу / Й. Й. Білінський, Б. П. Книш // Контроль і управління в складних системах (КУСС-2012) : тези доповідей XI Міжнародна конференція. – Вінниця, 2012. – С. 62–63.

60. Сравнительный анализ средств измерений сжиженных углеводородных газов. Условия обеспечения метрологических характеристик [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://promizmeritel.ru/publ4.pdf>.

61. Хроматографы [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.ximuk.ru/bse/3075.html>.

62. Білінський Й. Й. Розробка оптичного сенсора концентрації газу [Електронний ресурс] / Й. Й. Білінський, Б. П. Книш // Підсумки 40-ї регіональної науково-технічної конференції професорсько-викладацького складу, співробітників та студентів університету. – Режим доступу: <http://conf.vntu.edu.ua/allvntu/2011/inrtzp/txt/knysh.pdf>.

63. Білінський Й. Й. Розробка оптичного сенсора концентрації газу / Й. Й. Білінський, Б. П. Книш // Сучасні проблеми радіотехніки та телекомунікацій «РТ-2011» : тези доповідей 7-ї Міжнар. конф. – Севастополь, 2011. – С. 55.

64. Білінський Й. Й. Моделювання оптичного сенсора концентрації газу / Й. Й. Білінський, Б. П. Книш // Сучасні проблеми радіоелектроніки, телекомунікацій та приладобудування (СПРТП-2011) : тези доповідей 5-ї Міжнар. конф. – Вінниця, 2011. – С. 69.

65. Білінський Й. Й. Інфрачервоний двохвильовий сенсор концентрації газу з лінійною вихідною характеристикою / Й. Й. Білінський, Б. П. Книш // Вимірювання контроль та діагностика в технічних системах (ВКДТС-2011) : тези доповідей I Міжнар. наук.-техн. конф. – Вінниця, 2011. – С. 70.

66. Портативный плотномер газа LPGDi [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [http://www.linolab.ru/Katalog\\_tovarov/Laboratornoe\\_oborudovanie\\_i\\_pribory/Plotnometry?new\\_window=yes&product\\_id=47485](http://www.linolab.ru/Katalog_tovarov/Laboratornoe_oborudovanie_i_pribory/Plotnometry?new_window=yes&product_id=47485).

67. Білінський Й. Й. Триканальний сенсор газу [Електронний ресурс] / Й. Й. Білінський, Б. П. Книш // Підсумки 41-ї регіональної науково-технічної конференції професорсько-викладацького складу, співробітників та студентів університету. – Режим доступу: <http://conf.vntu.edu.ua/allvntu/2012/inrtzp/el.php>.

68. Білінський Й. Й. Триканальний оптичний сенсор концентрації вуглеводнів / Й. Й. Білінський, Б. П. Книш // Сучасні проблеми радіотехніки та телекомунікацій «РТ-2012» : тези доповідей 8-ї Міжнар. конф. – Севастополь, 2012. – С. 55.

69. Лазарев И. В. Метод синтеза структур адаптивных измерителей временных параметров импульсов сложной формы по критерию «Эффективность – интегрированные затраты» в условиях параметрической априорной неопределенности // Вестник Воронежского института МВД России. – 2010. – № 1. – С. 144–148.

70. Осадчий Е. П. Проектирование датчиков для измерения механических величин / Е. П. Осадчий. – М. : Машиностроение, 1979. – 480 с.

71. Білінський Й. Й. Пристрій для визначення об'єму зрідженого нафтового газу / Й. Й. Білінський, Б. П. Книш // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах (ВОТТП-12-2013) : тези доповідей XII Міжнар. наук.-техн. конф. – Одеса, 2013. – С. 31.

72. Совлуков А. С. Сравнительный анализ существующих методов измерений массы светлых нефтепродуктов в резервуарах / А. С. Совлуков, В. И. Терешин // Актуальные вопросы метрологического обеспечения измерений расхода и количества жидкостей и газов : тезисы докладов 3-й Международной метрологической конференции – Казань, 2015. – С. 72–78.

73. Вимірювання густини рідин [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [http://www.vsp.com.ua/mobrey/systems\\_1](http://www.vsp.com.ua/mobrey/systems_1).

74. Плотномер радиоизотопный ПРИЗ-Т [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [http://tetra.ua/production/radioisotope\\_apparatus/priz-t](http://tetra.ua/production/radioisotope_apparatus/priz-t).

75. Иоффе Б. В. Рефрактометрические методы химии / Б. В. Иоффе. – Л. : Химия, 1983. – 352 с.

76. Чепурний М. М. Застосування теорії подібності для розв'язання задач тепломасообміну / М. М. Чепурний, С. Й. Ткаченко, В. В. Бужинський. – Вінниця : ВДТУ, 2001. – 110 с.

77. Иванов В. И. Полупроводниковые оптоэлектронные приборы : справочник / В. И. Иванов, А. И. Аксенов, А. М. Юшин. – М. : Энергоатомиздат, 1989. – 448 с.

78. Гильярди Р. М. Оптическая связь / Р. М. Гильярди, Ш. Карп. – М. : Связь, 1978. – 456 с.

79. Гринев А. Ю. Постоеие передающих устройств оптического диапазона волн / А. Ю. Гринев, А. М. Братчиков, Е. Н. Воронин. – М. : МАИ, 1985. – 560 с.

80. Білінський Й. Й. Метод та засіб визначення кількісного вмісту скрапленого нафтового газу [Електронний ресурс] / Й. Й. Білінський, Б. П. Книш // Підсумки 44-ї регіональної науково-технічної конференції професорсько-викладацького складу, співробітників та студентів університету. – Режим доступу: <http://conf.vntu.edu.ua/allvntu/2015/inrtzp/el.php>.

81. Білінський Й. Й. Засіб вимірювального контролю кількісного вмісту скрапленого газу / Й. Й. Білінський, Б. П. Книш // Комп'ютерні технології: інновації, проблеми, рішення 2015 : тези доповідей I Всеукраїнської науково-технічної конференції. – Житомир, 2015. – С. 59–60.

82. Білінський Й. Й. Засіб вимірювального контролю кількісного вмісту скрапленого нафтового газу [Електронний ресурс] / Й. Й. Білінський, Б. П. Книш // Молодь в технічних науках: дослідження, проблеми, перспективи (МТН-2015) : матеріали Міжнародної

науково-практичної інтернет-конференції. – Режим доступу: <http://conf.inmad.vntu.edu.ua/fm/index.php?page=materials&line=13&mat=84>.

83. Білінський Й. Й. Термометричний метод визначення кількісного вмісту скрапленого нафтового газу та його функція перетворення / Й. Й. Білінський, Б. П. Книш // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах (ВОТТП-14-2015) : тези доповідей XIV Міжнар. наук.-техн. конф. – Одеса, 2015. – С. 67.

84. Володарський Є. Т. Метрологічне забезпечення вимірювань і контролю : навчальний посібник / Є. Т. Володарський, В. В. Кухарчук, В. О. Поджаренко, Г. Б. Сердюк. – Вінниця : Велес, 2001. – 219 с.

85. Дунаев Б. Б. Точность измерений при контроле качества / Б. Б. Дунаев. – К. : Техніка, 1981. – 152 с.

86. Володарський Є. Т. Підвищення вірогідності контролю з застосуванням адаптивного алгоритму / Є. Т. Володарський, І. П. Москаленко // Наукові вісті НТУУ «КПІ». – 1999. – № 3. – С. 111–114.

87. Электронные компоненты для профессионалов [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [http://www.itis.spb.ru/temp/phi\\_temp.htm](http://www.itis.spb.ru/temp/phi_temp.htm).

88. ПД100 Преобразователь давления измерительный [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [http://www.owen.ru/uploads/re\\_pd100\\_1499.pdf](http://www.owen.ru/uploads/re_pd100_1499.pdf).

89. МТЕС [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://radiocom.dn.ua/image/data/pdf/ТЕС1-0XXXXX.pdf>.

90. Локазюк В. М. Мікропроцесори та мікроЕОМ у виробничих системах : посібник / В. М. Локазюк. – К. : Академія, 2002. – 368 с.

91. Пейтон Дж. Аналоговая электроника на операционных усилителях / Дж. Пейтон, В. Волш. – М. : БИНОМ, 1994. – 352 с.

92. Вольфганг Р. Как работают аналого-цифровые преобразователи и что можно узнать из спецификации на АЦП / Р. Вольфганг // Компоненты и технологии. – 2005. – № 3. – С. 20–24.

93. Гитис Э. И. Аналогоцифровые преобразователи : учеб. пособие для вузов / Э. И. Гитис, Е. А. Пискулов. – М. : Энергоиздат, 1981. – 360 с.

94. Паргала О. Н. Цифровая электроника / О. Н. Паргала. – СПб. : Наука и техника, 2000. – 208 с.

95. Білінський Й. Й. Аналіз похибок автоматизованого контролю вологості природного газу / Й. Й. Білінський, О. С. Городецька, С. С. Білошкурський // Східно-Європейський журнал передових технологій. – 2012. – № 6/12. – С. 30–33.
96. Гвоздева Н. П. Физическая оптика : учебник для учащихся высших и средних специальных учебных заведений / Н. П. Гвоздева, В. И. Кульянова, Т. М. Леушина. – М. : Машиностроение, 1991. – 304 с.
97. Іщенко В. А. Високочутливі засоби контролю малих концентрацій газів : монографія / В. А. Іщенко, В. Г. Петрук. – Вінниця : ВНТУ, 2010. – 152 с.
98. Ишанин Г. Г. Источники и приемники излучения : уч. пос. для студ. оптич. спец. / Г. Г. Ишанин, Э. Д. Панков, А. Л. Андреев. – СПб. : Политехника, 1991. – 240 с.
99. Федорков Б. Г. Микросхемы ЦАП и АЦП: функционирование, параметры, применение / Б. Г. Федорков, В. А. Телец. – М. : Энергоатомиздат, 1990. – 320 с.
100. Венцель Е. С. Теория вероятностей : учеб. для вузов / Е. С. Венцель. – М. : Высш. шк., 1999. – 576 с.
101. Лавренчик В. Н. Постановка физического эксперимента и статистическая обработка его результатов / В. Н. Лавренчик. – М. : Энергоатомиздат, 1986. – 272 с.
102. Венцель Е. С. Теория случайных процессов и ее инженерные приложения / Е. С. Венцель, Л. А. Овчаров. – М. : Наука, 1991. – 384 с.
103. Фрумкин В. Д., Теория вероятностей и статистика в метрологии и измерительной технике / В. Д. Фрумкин, Н. А. Рубичев. – М. : Машиностроение, 1987. – 168 с.
104. Волков В. А. Справочник по приемникам оптического излучения / В. А. Волков, В. К. Вялов, Л. Г. Гассанов. – К. : Техніка, 1985. – 216 с.
105. Гавриленко В. И. Оптические свойства полупроводников : справочник / В. И. Гавриленко, А. М. Грехов, Д. В. Корбутяк, В. Г. Литовченко. – К. : Наукова думка, 1987. – 607 с.
106. Грабовский Р. И. Курс физики : учеб. пособие / Р. И. Грабовский. – М. : Высш. школа, 1980. – 607 с.
107. Агуров П. В. Интерфейсы USB. Практика использования и программирования / П. В. Агуров. – СПб. : БХВ-Петербург, 2004. – 576 с.

108. Ярославский Л. П. Цифровая обработка сигналов в оптике и голографии. Введение в цифровую оптику / Л. П. Ярославский. – М. : Радио и связь, 1987. – 296 с.
109. Физико-химические свойства пропан-бутановой смеси [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://fas.su/page-319>.
110. Sovlukov A. S. Determination of liquefied petroleum gas quantity in a reservoir by radiofrequency techniques / A. S. Sovlukov, V. I. Tereshin // Proc. of the 20th IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference. Vail, CO, USA. – 2003. – V. 1. – P. 368–373.
111. Рефрактометр лабораторный Серия RFM300+ [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://www.ecoinstrument.com.ua/katalog/refraktometry/refraktometr-laboratornyj-seriya-rfm300>.
112. Толуол. Технические условия : ГОСТ 5789-78. – М. : Миннефтехимпром СССР, 1978. – 2 с.
113. Изооктаны эталонные. Технические условия ГОСТ 12433-83. – М. : Миннефтехимпром СССР, 1983. – 2 с.
114. Расчет плотности нефтепродуктов [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://elarum.ru/info/references/density>.
115. Способы приготовления растворов [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://konspekta.net/lek-3597.html>.
116. Решетникова В. Н. Методы приготовления специальных растворов и сред / В. Н. Решетникова, М. А. Занина, Е. Б. Смирнова. – Балашов : Знание, 2007. – 48 с.
117. Максимов В. П. Измерение, обработка и анализ быстропротекающих процессов / В. П. Максимов, И. В. Егоров, В. А. Карасев. – М. : Машиностроение, 1987. – 208 с.
118. Егоров А. Е. Исследование устройств и систем автоматики методом планирования эксперимента / А. Е. Егоров, Г. Н. Азаров, А. В. Коваль. – Х. : Вища школа, 1986. – 240 с.
119. Володарский Е. Т. Уменьшение влияния погрешности измерительного канала на достоверность контроля / Е. Т. Володарский, И. П. Москаленко // Измерения – 98 : сб. труд. МНТК. – 1998. – № 1. – С. 266–267.

*Наукове видання*

**Йосип Йосипович Білінський  
Богдан Петрович Книш**

**ТЕРМООПТИЧНИЙ МЕТОД І ЗАСІБ  
ВИМІРЮВАЛЬНОГО КОНТРОЛЮ КОМПОНЕНТІВ  
СКРАПЛЕНОГО НАФТОВОГО ГАЗУ**

Монографія

Редактор С. Малішевська

Оригінал-макет підготовлено авторами

Підписано до друку 09.03.2017 р.

Формат 29,7×42¼. Папір офсетний.

Гарнітура Times New Roman.

Друк різнографічний. Ум. др. арк. 6,47.

Наклад 300 (1-й запуск 1–75) пр. Зам № В2017-07

Вінницький національний технічний університет,

КІВЦ ВНТУ,

21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95,

ВНТУ, ГНК, к. 114.

Тел. (0432) 59-85-32.

**publish.vntu.edu.ua; email: kivc.vntu@gmail.com.**

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи

серія ДК № 3516 від 01.07.2009 р.

Віддруковано ФОП Барановська Т. П.

21021, м. Вінниця, вул. Порики, 7.

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи

серія ДК № 4377 від 31.07.2012 р.