

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу
Факультет автоматизації та енергетики
Кафедра інформаційно-вимірювальних технологій та
енергетичного менеджменту

Петраш Софія Степанівна

(прізвище, ім'я, по батькові)

УДК 620.179
(індекс)

БАКАЛАВРСЬКА РОБОТА

**Удосконалення процесу хроматографії природного газу
при оцінюванні його якості**

(назва роботи)

Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка

(назва освітньої програми)

152 Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка

(шифр і назва спеціальності)

**Робота містить результати власних досліджень, використання ідей,
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело:**

Здобувач освітнього ступеня С.С. Петраш

(підпис, ініціали та прізвище здобувача)

Науковий керівник Барна Ольга Борисівна.

(підпис, прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання
керівника)

Допущено до захисту

Завідувач кафедри

Віталій ЦИХ

(посада) (підпис) (дата) (ініціали та прізвище)

Івано-Франківськ – 2025

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

(повне найменування закладу вищої освіти)

Факультет автоматизації та енергетики

Кафедра інформаційно-вимірювальних технологій та енергетичного менеджменту

Освітній рівень перший (бакалаврський)

Спеціальність 152- Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка

(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри ІВТЕМ

В.С. Цих

« » 20 року

**З А В Д А Н Н Я
НА БАКАЛАВРСЬКУ РОБОТУ СТУДЕНТОВІ**

Петраш Софії Степанівні

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Удосконалення процесу хроматографії природного газу при оцінюванні його якості

керівник роботи Барна Ольга Борисівна.,

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затвержені наказом закладу вищої освіти від “30” квітня 2025 року № 270/7

2. Строк подання студентом роботи 20.06.2025

3. Вихідні дані до роботи Нормативна база: ISO 6974-1, ISO 6976, хроматографічний аналіз природного газу, Кристалл-2000М, ChroZen GC Використання хроматограм, калібрувальних розчинів, таблиць розрахунку теплоти згоряння та густини

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)

1. Теоретичні основи хроматографії природного газу

2. Огляд та порівняння газових хроматографів (ChroZen GC, Кристалл-2000М)

3. Методика аналізу природного газу

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)

1. Структурна схема газового хроматографа

2. Типова хроматограма

3. Порівняльна таблиця характеристик приладів

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
4	Кривенко Г.М., доц. каф. ТЗНС та БП		
нормо контроль	Лютак З.П., проф. каф. ІВТЕМ		

7. Дата видачі завдання 05.05.2025р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів бакалаврської роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1.	<i>Вступ</i>	15.05.2025	
2.	<i>Теоретичний аналіз методів газової хроматографії</i>	01.06.2025	
3.	<i>Аналіз та порівняння хроматографів</i>	10.06.2025	
4.	<i>Розроблення пропозицій щодо вдосконалення процесу</i>	15.06.2025	
5.	<i>Охорона праці</i>	15.06.2025	
6.	<i>Оформлення бакалаврської роботи</i>	20.06.2025	

Студент _____
(підпис)

Петраш С. С.
(прізвище та

ініціали)

Керівник роботи _____
(підпис)

Барна О. Б.
(прізвище та ініціали)

ABSTRACT

The bachelor's thesis is devoted to the improvement of the chromatographic analysis process for the quality assessment of natural gas. The aim of the research is to study modern chromatographic equipment and analytical methods, identify the main sources of error, and propose technical and methodological improvements to increase accuracy and reliability. The object of the research is the process of gas chromatography; the subject is its optimization using modern instruments such as ChroZen GC and Kristall-2000M. The work analyzes chromatographic methods, calibration schemes, and detector systems. The results provide recommendations for enhancing measurement precision and reducing uncertainty in determining the gas composition. The developed approach contributes to improving the efficiency and reliability of natural gas quality control.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	7
РОЗДІЛ 1: Газова хроматографія: принципи, розвиток і значення	9
1.1 Історія та розвиток методу газової хроматографії.....	9
1.2 Будова та принцип дії газового хроматографа.....	14
1.3 Методика аналізу природного газу та вимоги стандартів.....	20
1.4 Практичне значення, точність, похибки та перспективи	31
РОЗДІЛ 2. Порівняння сучасних газових хроматографів: «КРИСТАЛЛ-2000М» та CHROZEN GC	40
2.1 Історичний розвиток та вдосконалення газової хроматографії.....	40
2.2 Конструктивні особливості та функціональні можливості газового хроматографа «Кристалл-2000М»	45
2.3 Сучасна автоматизація та точність вимірювання: газовий хроматограф ChroZen GC	47
2.3 Сучасна автоматизація та функціональні можливості газового хроматографа ChroZen GC.....	50
2.4 Порівняльна характеристика приладів, точність, похибки та перспективи розвитку хроматографії	53
РОЗДІЛ 3. Удосконалення процесу хроматографії природного газу при оцінюванні його якості	59
3.1 Технічне вдосконалення хроматографічного обладнання	59
3.2 Автоматизація процесів та програмне забезпечення.....	63
3.3 Аналіз нестандартних проб природного газу.....	67
3.4 Стандартизація та забезпечення якості аналізу.....	73
РОЗДІЛ 4. Охорона праці.....	81
4.1 Загальні принципи охорони праці в лабораторії.....	81
4.2 Технічні та організаційні заходи безпеки	82
4.3 Безпека роботи з приладами та хімічними речовинами	87
4.4 Вимоги до вентиляції та мікроклімату в лабораторних приміщеннях	90
Список використаних джерел.....	96

ВСТУП

У сучасному етапі розвитку національної та світової енергетики важливе місце посідає питання контролю якості природного газу як основного джерела енергії для промисловості, транспорту та побутового сектору. [14]

Ефективне функціонування газотранспортних систем, прозорість розрахунків між постачальниками і споживачами, а також відповідність екологічним вимогам значною мірою залежать від точності та достовірності даних про склад газової суміші. [14] У цьому контексті газова хроматографія постає як ключовий інструмент кількісного й якісного аналізу. [14]

Науково-технічний прогрес у галузі аналітичної хімії обумовив постійне вдосконалення приладів та методик хроматографічного аналізу. В умовах підвищених вимог до точності, повторюваності й швидкодії визначень виникає потреба в автоматизації процесів, впровадженні інтелектуальних систем обробки сигналу та дистанційного контролю за роботою обладнання.

Проте технічне оновлення не є самодостатнім: для досягнення високої якості результатів необхідним є також удосконалення методології підготовки проб, аналізу похибок, впровадження стандартних операційних процедур та використання контрольних матеріалів.

Особливу актуальність тема дослідження набуває у світлі посилення інтеграційних процесів між Україною та Європейським Союзом, що зумовлює необхідність гармонізації підходів до контролю якості палива.

Стандарти ISO 6976, ISO 10723, а також європейські технічні регламенти вимагають дотримання високих стандартів точності, калібрування, верифікації аналітичного обладнання. [12] Водночас лабораторії, які здійснюють вимірювання, повинні діяти відповідно до процедур, що мінімізують похибки та враховують термодинамічні характеристики газових сумішей. [14]

Ключовими чинниками, що впливають на достовірність аналізу, є стан газової колонки, стабільність температурного режиму, точність дозування проби, якість газів-носіїв, а також програмне забезпечення для обробки результатів. [14]

Серед перспективних напрямів розвитку газової хроматографії варто відзначити використання мініатюризованих систем, автоматичних платформ калібрування, застосування блокчейн-технологій для захисту даних, а також алгоритмів машинного навчання для інтерпретації складних аналітичних сигналів. [14] [13]

Метою даної роботи є дослідження і обґрунтування шляхів підвищення ефективності процесу газової хроматографії для оцінювання якості природного газу. [14] [13]

Завдання включають аналіз сучасних технічних рішень, оцінку методик пробопідготовки, ідентифікацію системних похибок та формування рекомендацій щодо покращення точності і надійності аналітичних даних.

Узагальнюючи, можна стверджувати, що вдосконалення газової хроматографії є не лише технологічним викликом, а й стратегічним завданням у контексті енергетичної безпеки, сталого розвитку та інтеграції до міжнародного ринку природного газу. [14] [13]

РОЗДІЛ 1: Газова хроматографія: принципи, розвиток і значення

1.1 Історія та розвиток методу газової хроматографії

Газова хроматографія — це метод аналітичної хімії, який протягом десятиліть зазнав значної еволюції і перетворився на один з основних інструментів для дослідження складу природного газу, складних сумішей, летких речовин та багатьох інших об'єктів. [14] Початок цього методу сягає початку ХХ століття. Його основоположником вважається російський вчений Михайло Семенович Цвет, який у 1903 році здійснив перші спроби розділення складних органічних сумішей методом колонкової хроматографії. Він використовував скляну колонку, заповнену адсорбентом (крейдою), і спостерігав розділення рослинних пігментів на окремі кольорові зони. Саме завдяки цим кольоровим зонам метод отримав назву «хроматографія» — від грецького «χρῶμα» (хрома, колір) та «γραφειν» (писати). Його дослідження були революційними для свого часу, однак через брак технічних засобів та обмежену доступність публікацій метод залишився маловідомим у західній науковій спільноті протягом кількох десятиліть.

Після Другої світової війни хроматографія отримала новий імпульс до розвитку. У 1941 році британські вчені Арчер Джон Мартін та Річард Сіндж розробили теоретичні основи розподільної хроматографії. Вони експериментували з розділенням амінокислот і запропонували ідею, згідно з якою речовини можуть розподілятися між двома рідкими фазами. Це відкриття мало далекосяжні наслідки. В 1952 році за свої дослідження Мартін і Сіндж отримали Нобелівську

премію з хімії. Їхня робота заклала підґрунтя для розвитку різних видів хроматографії: рідинної, іонної, тонкошарової і, згодом, газової. [14]

Газова хроматографія як окремий напрям почала формуватися в 1950-х роках. Вчені звернули увагу на використання газу як рухомої фази. [14] Газ мав значні переваги: низьку в'язкість, високу швидкість переміщення, інертність. Перші газові хроматографи були примітивними — без термостатування, зі скляними колонками і простими детекторами. [14] Проте навіть на цьому етапі метод показав високу ефективність. Він дозволяв розділяти суміші з леткими компонентами, що було дуже важливо для нафтогазової, хімічної та харчової галузей. [14]

У 1960–1970-х роках розвиток газової хроматографії пришвидшився. [14] [13] Було створено перші комерційні прилади: Agilent, Shimadzu, PerkinElmer почали серійне виробництво лабораторних хроматографів. З'явилися нові типи детекторів: TCD (теплопровідний), FID (полум'яно-іонізаційний), ECD (електронозахоплювальний). Саме FID став «золотим стандартом» у визначенні органічних речовин. Удосконалення торкнулося і колонок — із скляних їх замінили на капілярні з металевим покриттям, що забезпечувало кращу роздільну здатність і стабільність температури.

Особливу роль ГХ почала відігравати у сфері природного газу. [14] У 1980-х роках із зростанням потреби в точному комерційному обліку газу зросла й потреба в надійних методах аналізу. [14] Газова хроматографія стала основним інструментом для визначення молекулярного складу, теплоти згоряння, числа Воббе, густини газу. [14] Виникла потреба у стандартизації процесів. Саме тоді з'явилися міжнародні стандарти ISO 6974 і ISO 6976, які й донині регламентують

порядок проведення аналізу природного газу та розрахунку його енергетичних характеристик. [14] [12] [10]

У цей же період комп'ютеризація дала можливість автоматизувати процес аналізу. Програмне забезпечення дозволило зчитувати хроматограми, обробляти дані в реальному часі, зберігати інформацію про склад сумішей, проводити архівацію результатів. Це дозволило скоротити людський фактор і підвищити достовірність даних. Важливо, що аналіз став доступним не лише в лабораторіях, а й безпосередньо на об'єктах — у точках комерційного обліку, на ГРС, у компресорних станціях.

В Україні метод газової хроматографії почав активно впроваджуватись у 1990-х роках. [14] [13] Після здобуття незалежності виникла необхідність відповідати міжнародним стандартам. Було закуплено перші хроматографи західного виробництва, навчено фахівців, адаптовано європейські методики. ДП «Укрметртестстандарт» та інші організації почали розробку національних стандартів на базі ISO. Сьогодні практично кожна газорозподільча компанія, лабораторія митної або екологічної служби має у своєму розпорядженні хоча б один хроматограф. [14]

Газова хроматографія продовжує вдосконалюватися. Нові моделі мають функцію самокалібрування, вбудовані GSM-модулі для передачі даних, телеметрію, хмарну синхронізацію. Аналізи стали настільки точними, що дають змогу визначати речовини на рівні ppm (частин на мільйон). Крім того, з'являються мініатюрні переносні хроматографи, що використовуються в польових умовах, на об'єктах критичної інфраструктури, а також в аварійних ситуаціях.

Сучасна ГХ виходить за межі лабораторного аналізу. Вона інтегрується у системи SCADA, дозволяє здійснювати віддалений контроль, створює базу даних для машинного навчання. Прогнозування коливань складу газу, попередження аварій, оптимізація логістики — усе це забезпечується шляхом інтеграції ГХ у цифрову екосистему підприємства. [14] Очевидно, що роль хроматографії у XXI столітті не зменшується, а навпаки — зростає.

Таким чином, хроматографія — це не просто метод аналізу. Це фундамент сучасної енергетики, хімії, екології. Від простого скляного циліндра у лабораторії Цвета — до автоматизованих цифрових систем. Історія газової хроматографії — це історія про те, як наука змінює промисловість. [14] [13] [1]

У контексті подальшого розвитку газової хроматографії важливо відзначити інтеграцію аналітичних систем у загальні цифрові технології управління підприємствами. [14] [13] Наприклад, сучасні хроматографи можуть бути частиною SCADA-систем, що дозволяє безперервно контролювати склад природного газу у реальному часі, а також автоматично реагувати на зміни параметрів. [14] Це значно підвищує безпеку та надійність технологічних процесів. Зібрані дані можуть бути використані для побудови аналітичних моделей, які допомагають у прийнятті управлінських рішень. Інформація про якість газу передається у центральні бази даних, де вона обробляється та зберігається, створюючи архів результатів для довгострокового аналізу та аудиту. [14]

Крім промислового застосування, ГХ активно використовується в академічній сфері. Багато університетів і науково-дослідних установ в Україні мають у своєму розпорядженні хроматографічне обладнання,

що використовується для досліджень у сфері хімії, біології, екології. Студенти вивчають принципи роботи хроматографів, виконують лабораторні роботи з розділення сумішей, аналізу якості повітря, води та продуктів харчування. Така підготовка дозволяє формувати нове покоління фахівців, здатних ефективно використовувати аналітичні методи у практичній діяльності.

Історія хроматографії показує, як фундаментальні наукові відкриття трансформуються у прикладні інструменти, які мають стратегічне значення для економіки, екології та національної безпеки. Використання ГХ у контролі якості палива, у криміналістиці, медицині, а також у міжнародних енергетичних розрахунках — це яскраве свідчення універсальності методу. Незважаючи на високу технічну складність, сучасні хроматографи доступні у використанні, завдяки програмному забезпеченню з інтуїтивно зрозумілим інтерфейсом, автоматичним алгоритмам калібрування та діагностики.

У найближчому майбутньому очікується ще більша автоматизація аналітичних процесів. Уже зараз існують хроматографи з елементами штучного інтелекту, які можуть самостійно визначати тип аналізу, налаштовувати параметри, здійснювати контроль якості проби. Технології «розумних сенсорів» дозволяють інтегрувати ГХ у загальні платформи Інтернету речей (Internet of Things, IoT), де дані з різних джерел об'єднуються у єдину систему для комплексного аналізу. Важливо, що ці процеси відбуваються не тільки у провідних країнах світу, але й в Україні, де зростає попит на сучасні рішення у сфері метрології та контролю якості.

Газова хроматографія є і залишатиметься ключовим методом контролю енергоносіїв у XXI столітті. Її точність, швидкість,

адаптивність роблять її незамінною як у промисловості, так і в наукових дослідженнях. Історія ГХ — це приклад того, як науковий підхід, підтриманий технічним прогресом і потребами суспільства, може сформувати цілі галузі знань і практики. Сьогодні хроматографія — це не просто технологія, а стратегічний ресурс, на якому будується довіра до результатів аналізу, безпека транспортування енергоносіїв, а також відповідність міжнародним нормам та стандартам. [1]

1.2 Будова та принцип дії газового хроматографа

Газовий хроматограф — це складний прилад, який використовується для якісного та кількісного аналізу складних газових сумішей. [14] Його головна функція полягає в тому, щоб розділити компоненти суміші на окремі складники та визначити їх концентрації. Для досягнення цього методу застосовується хімічна і фізична взаємодія між газовими молекулами та нерухомою фазою, що знаходиться всередині колонки. [14]

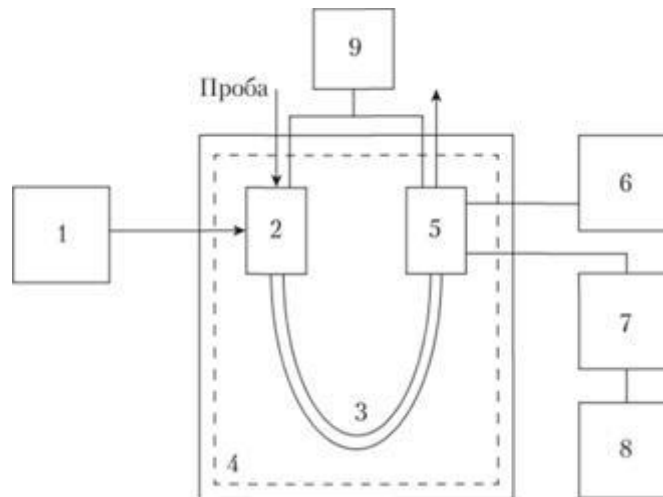


Рисунок 1.1 – Схема будови газового хроматографа.

Основними складовими частинами типового газового хроматографа є: джерело газу-носія, інжектор (впорскувач проби), хроматографічна колонка, термостат (печка), детектор, система збору та

обробки даних, а також система управління тиском і температурою. [14] Кожна з цих частин виконує важливу функцію в процесі аналізу.

Газ-носії є основною рухомою фазою в системі. Найчастіше використовуються гелій, водень або азот, залежно від типу детектора та досліджуваної суміші. Газ-носії транспортують пробу через колонку, де відбувається розділення її компонентів.

Інжектор або впорскувач проби — це пристрій, який дозволяє ввести газову або рідку пробу в потік газу-носія. [14] Високоточні інжектори забезпечують дозування дуже малих об'ємів речовини, що необхідно для точного аналізу.

Хроматографічна колонка — це серце приладу. Вона може бути заповнена твердим сорбентом або вкрита рідкою фазою, залежно від типу аналізу. Колонка розташована в термостатованій камері (печі), де підтримується постійна температура або використовується температурне програмування. В колонці відбувається розділення речовин відповідно до їх взаємодії з нерухомою фазою.

Детектор виконує роль сенсора, що фіксує час виходу речовин із колонки та інтенсивність сигналу. Залежно від типу аналізу та речовин, що досліджуються, використовують різні типи детекторів: теплопровідний (TCD), полум'яно-іонізаційний (FID), електронозахоплювальний (ECD), фотометричний тощо. Наприклад, FID широко застосовується для аналізу органічних сполук завдяки високій чутливості.

Сучасні хроматографи обладнані електронними блоками управління, дисплеями, програмним забезпеченням, що дозволяє автоматизувати процес аналізу: від калібрування та відбору проби до виведення результатів у графічному або табличному вигляді.

Після того як компоненти проби проходять через колонку і фіксуються детектором, програма обчислює їх концентрації за площею під піками на хроматограмі. Кожен пік відповідає окремому компоненту. Час виходу (ретенційний час) і площа під піком є основою для розпізнавання та кількісної оцінки речовини.

Принцип дії хроматографа можна схематично описати як послідовність дій: введення проби транспортування газом-носієм розділення в колонці детектування обробка даних. [14] Цей алгоритм повторюється з високою точністю та відтворюваністю, що дозволяє використовувати ГХ як засіб метрологічного контролю.

Таким чином, будова та принцип дії газового хроматографа забезпечують високий рівень точності, чутливості та швидкості аналізу, що робить його незамінним у промисловості, енергетиці, науці та екологічному моніторингу. [14] [1]

Однією з ключових переваг газового хроматографа є його здатність забезпечити точний і відтворюваний аналіз навіть при мінімальних об'ємах проби. [14] Це особливо важливо для аналізу природного газу, де навіть незначна зміна у складі може суттєво вплинути на теплоту згоряння, густину чи енергетичну цінність. [14] Саме тому будова приладу передбачає максимальну герметичність, точність у регулюванні потоку газу та контроль температури з найменшими допусками. [14]

Кожна складова частина приладу виконує свою функцію, однак їхня ефективність досягається лише при комплексній взаємодії. Наприклад, точне дозування проби забезпечується системою інжекції, яка повинна функціонувати в синхронізації з температурним контролем колонки. Наявність термостатованого середовища дозволяє

підтримувати стабільні умови протягом усього циклу аналізу, що унеможлиблює викривлення результатів.

Особливу увагу слід приділити детекторам. Полум'яно-іонізаційний детектор (FID), наприклад, здатен виявити найменші концентрації вуглеводнів, і тому є незамінним у природному газі. [14] Інші детектори, такі як електронозахоплювальний (ECD), використовуються для виявлення галогенованих сполук. Їх вибір залежить від задачі аналізу, типу проби, а також вимог до чутливості та межі виявлення. Деякі сучасні газові хроматографи дозволяють одночасно встановлювати кілька типів детекторів, що розширює можливості аналізу. [14]

Програмне забезпечення сучасних хроматографів виконує не лише функції керування та реєстрації даних, а й забезпечує глибоку аналітичну обробку результатів. Наприклад, системи можуть проводити автоматичну інтеграцію пік-функцій, розрахунок похибок, повторне калібрування, а також архівацію серій аналізів. Така інтеграція дозволяє користувачу не лише бачити результати, а й контролювати якість та стабільність приладу в динаміці.

Хроматографи також можуть бути обладнані спеціальними пристроями для попередньої підготовки проб. Наприклад, сепаратори вологи, фільтри, системи дегазації та навіть концентратори речовин для проб із низьким вмістом компонентів. [14] Все це дозволяє адаптувати аналіз під конкретні умови експлуатації: від стандартних лабораторних умов до польових досліджень або критично важливих об'єктів енергетичної інфраструктури.

Газова хроматографія, як технологія, вимагає від користувача не лише навичок роботи з обладнанням, а й розуміння фізико-хімічних

процесів, що відбуваються під час аналізу. Наприклад, вибір типу колонки залежить від хімічних властивостей аналізованих речовин — полярності, молекулярної маси, температури кипіння. Крім того, важливим є і вибір газу-носія, адже різні газові середовища по-різному впливають на роздільну здатність і швидкість аналізу. [14] Найчастіше використовують гелій завдяки його високій інертності та теплопровідності, однак через його вартість часто застосовують альтернативи, такі як водень чи азот.

Не менш важливим є і процес калібрування приладу. Зазвичай використовується набір стандартних зразків із точно відомим вмістом компонентів. Це дозволяє побудувати калібрувальну криву для кожного компонента та забезпечити відповідність вимогам точності. Прилади автоматичного калібрування значно полегшують роботу оператора і підвищують стабільність результатів.

Отже, газовий хроматограф — це складна, але надзвичайно ефективна система, яка базується на синергії багатьох компонентів. [14] Її будова продумана таким чином, щоб мінімізувати похибки, підвищити чутливість та забезпечити гнучкість під конкретні умови аналізу. У поєднанні з сучасними алгоритмами обробки результатів та засобами автоматизації, газова хроматографія забезпечує унікальну комбінацію точності, швидкості та надійності. [14] [1]

Варто також розглянути деякі реальні приклади застосування газового хроматографа у виробничих умовах. [14] У газотранспортних компаніях хроматографи використовуються на вузлах комерційного обліку для контролю складу газу, який постачається до споживачів. [14] Тут важливо мати точні та оперативні дані, адже кожна зміна у складі впливає на розрахунок вартості енергоносія. У разі

використання системи SCADA дані з хроматографа інтегруються у загальну платформу керування, що дозволяє контролювати параметри в реальному часі.

Іншим прикладом є використання хроматографів на підприємствах хімічної промисловості. Тут важливо не тільки знати склад вхідної сировини, а й контролювати продукти реакцій. За допомогою газової хроматографії можна своєчасно виявити утворення побічних продуктів, знизити ризик вибухів та перевищення гранично допустимих концентрацій речовин. [14] [13]

У лабораторіях екологічного моніторингу ГХ використовується для аналізу викидів в атмосферу, зокрема, для вимірювання вмісту метану, вуглеводнів, оксидів азоту та сірки. Завдяки високій чутливості методу можна виявити навіть незначні забруднення, що дозволяє своєчасно вживати заходів щодо зменшення негативного впливу на довкілля.

Окремо слід згадати про військове та аварійне застосування. Існують переносні хроматографи, які можна використовувати в польових умовах — наприклад, для виявлення токсичних речовин, аналізу повітря в зонах техногенних катастроф, контролю складу палив у військовій техніці. Їхньою перевагою є автономність, компактність і можливість швидкого запуску без складної підготовки.

Технічний прогрес у сфері ГХ не зупиняється. Наприклад, сучасні капілярні колонки виготовляються з надтонкого кварцового скла і покриваються полімерною нерухомою фазою з точно підібраними властивостями. Це дозволяє досягти надзвичайної роздільної здатності, навіть для речовин зі схожими фізико-хімічними параметрами. Крім того, завдяки температурному програмуванню

колонок стало можливим проводити послідовне розділення речовин з різними температурами кипіння в межах одного циклу аналізу.

Не менш важливим є також підвищення рівня автоматизації. Сучасні системи самі обирають оптимальні умови аналізу, реагують на зміни в потоках газу, сигналізують про перевищення порогових значень або помилки в процесі. [14] Це значно зменшує ризик людської помилки та дозволяє зосередитися оператору на інтерпретації результатів, а не на технічних моментах.

Усе це свідчить про те, що газова хроматографія залишається не лише актуальною, а й стратегічно важливою технологією для цілої низки галузей. [14] Її багатофункціональність, точність, адаптивність до різних умов та зразків роблять її незамінною частиною сучасного науково-технічного прогресу. І хоча технології постійно вдосконалюються, основа газової хроматографії — розділення речовин шляхом взаємодії з нерухомою фазою — залишається незмінною. [14] [13] Саме ця фундаментальність і дозволила методу зберегти актуальність протягом понад 100 років. [1]

1.3 Методика аналізу природного газу та вимоги стандартів

$$C_i = \frac{S_i}{S_{std}} \cdot C_{std}$$

де C_i — концентрація компонента,

S_i — площа піку компонента,

S_{std} } — площа піку стандарту,

C_{std} — концентрація стандарту.

Аналіз природного газу є ключовим етапом у процесі контролю його якості, обліку, комерційної оцінки та безпечного використання. [14] Газ, що використовується в енергетиці, промисловості чи побуті, повинен відповідати певним стандартам, які регламентують його склад,

фізико-хімічні властивості, теплоту згоряння, відносну густину та інші параметри. У зв'язку з цим виникає потреба у використанні точних та надійних аналітичних методів, серед яких газова хроматографія (ГХ) посідає провідне місце. [14]

Методика аналізу ґрунтується на застосуванні газових хроматографів для розділення суміші природного газу на індивідуальні компоненти, ідентифікації кожного з них та обчислення їх концентрацій. [14] Відповідно до сучасних міжнародних стандартів, аналіз проводиться з використанням каліброваних стандартів, перевірених умов проведення вимірювання, контрольованих температур і тиску. Після отримання компонентного складу, розраховуються вторинні параметри: вища та нижча теплота згоряння, густина, число Воббе, молекулярна маса, тощо.

Основним нормативним документом, який регламентує цей процес, є серія стандартів ISO 6974 «Природний газ — Визначення складу та пов'язаної з ним невизначеності методом газової хроматографії». [14] [13] [10] Частина 1 цього стандарту — ISO 6974-1 — містить загальні вказівки щодо вимірювання та обчислення компонентного складу. [10] Частина 2 — ISO 6974-2 — описує процедури оцінювання невизначеності результатів. [10] Також важливим є стандарт ISO 6976, який регламентує розрахунок фізико-хімічних властивостей газу на основі компонентного складу. [14] [12]

У нормативних документах чітко визначені вимоги до точності вимірювань, калібрування обладнання, типів детекторів, що можуть використовуватися, а також до обробки даних. Наприклад, у стандартах ISO прописано, що похибка визначення основних компонентів не повинна перевищувати певних меж, залежно від частки

у складі. Стандарти також встановлюють вимоги до підготовки проб, умов транспортування газу до хроматографа, тиску та температури, що повинні бути стабільними протягом усього аналізу. [14]

Для виконання вимог стандартів, хроматографи повинні проходити регулярну верифікацію, перевірку стабільності, тестування на наявність зносу колонок, детекторів та інших компонентів. Додатково, повинні застосовуватися контрольні газові суміші (calibration gas mixtures), які мають атестований склад і використовуються для побудови калібрувальних кривих. [14]

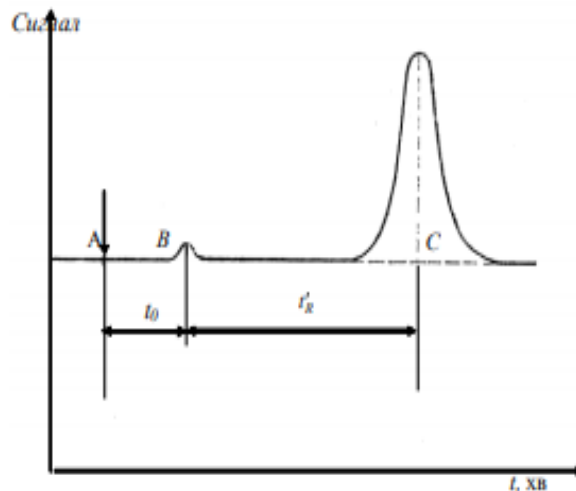


Рисунок 1.2 – Хроматограма: А – момент введення проби; В – пік речовини, яка не сорбується; Сигнал – сигнал детектора

У наступних розділах ці аспекти будуть деталізовані з прикладами методики аналізу, вимог до точності, опису розрахунків вторинних характеристик, а також практичних застосувань відповідно до національних та міжнародних норм. [1]

Процедура аналізу природного газу починається з відбору проби. [14] Відбір здійснюється за допомогою пробовідбірних пристроїв, які забезпечують герметичність, сталість тиску та запобігають змінам

складу газу до моменту аналізу. [14] Часто використовуються балони з нержавіючої сталі, які заповнюються газом під тиском. [14] Газ, який потрапляє до хроматографа, має проходити фільтрацію від можливих механічних домішок та вологи. Особливо критичним є виключення вологи, оскільки її наявність може негативно вплинути на роботу детекторів та викликати корозію елементів приладу.

Після підготовки проби здійснюється її впорскування в хроматограф. Важливо, щоб температура інжектора перевищувала точку роси газу, забезпечуючи повне випаровування усіх компонентів. [14] Газ-носіє транспортує пробу через колонку, де відбувається розділення. Тип колонки вибирається залежно від задачі аналізу: капілярні колонки мають вищу роздільну здатність, але потребують ретельного температурного контролю, тоді як заповнені колонки є більш універсальними.

Згідно зі стандартом ISO 6974-1, у типовій схемі аналізу повинні бути ідентифіковані такі основні компоненти природного газу: метан, етан, пропан, ізобутан, н-бутан, неопентан, пентани, гексан, азот, діоксид вуглецю. [14] [10] Для кожного з них визначаються концентрації, за якими далі розраховуються фізико-хімічні властивості газу. [14] Для коректного розрахунку слід враховувати також невизначеність вимірювань, яка може залежати від стабільності газу-носія, температурного режиму, стану детектора та якості калібрування. [14]

В ISO 6974-2 описано методику обчислення загальної невизначеності. [10] Основна увага приділяється сумарній похибці, яка враховує не тільки статистичну розбіжність вимірювань, але й систематичні похибки, пов'язані зі зносом колонок, дрейфом детектора

та нестабільністю температури. Ці чинники вимагають постійного контролю з боку оператора, а також регулярного технічного обслуговування приладу.

Наступним важливим етапом є розрахунок параметрів, які визначають енергетичну цінність газу. [14] Згідно зі стандартом ISO 6976, для кожного компонента газу існують табличні значення теплоти згоряння, густини, молярної маси. [14] [12] На основі виміряного компонентного складу здійснюється обчислення загальної теплоти згоряння, відносної густини та числа Воббе. Ці величини критично важливі для комерційних розрахунків, оскільки вони безпосередньо впливають на оплату поставок, балансування системи та планування споживання.

У багатьох випадках підприємства використовують спеціалізоване програмне забезпечення, що автоматично здійснює всі розрахунки. Вхідні дані вводяться з хроматографа, а на виході оператор отримує звіт, який містить повну картину: склад газу, фізико-хімічні властивості, похибки, дати, сигнатури контролю. [14] Це дозволяє формувати архівні бази даних, здійснювати аудит якості газу та формувати на їх основі технічні й комерційні звіти. [14]

Особливу увагу слід приділяти процедурі калібрування. Перед початком аналізу хроматограф повинен бути відкалібрований на контрольній суміші, склад якої точно відомий. Це дозволяє синхронізувати значення ретенційного часу, переконатися у правильності роботи детекторів та відповідності пік-функцій еталону. У разі відхилень від норми програма видає повідомлення про необхідність повторного калібрування або втручання оператора.

У випадках, коли природний газ містить сліди домішок (водень, кисень, сірка), необхідно застосовувати модифіковані методики аналізу. [14] Такі методи можуть передбачати використання спеціальних колонок, додаткових детекторів або попередню підготовку проби шляхом сорбції чи охолодження. Усі зміни повинні бути внесені до методики та підтверджені метрологічною службою підприємства.

Національні стандарти України, як правило, гармонізовані з ISO. Зокрема, ДСТУ EN ISO 6974-1:2021 та ДСТУ EN ISO 6976:2020 повністю відтворюють положення відповідних міжнародних документів. [12] [10] Це дозволяє забезпечити однаковий рівень якості аналізу як у вітчизняних лабораторіях, так і при співпраці з іноземними партнерами, особливо у випадках експорту природного газу або транскордонної торгівлі енергоресурсами. [14]

Таким чином, методика аналізу природного газу, заснована на газовій хроматографії, є не лише технічною процедурою, але й частиною загальної системи забезпечення якості, безпеки та відповідності нормативним вимогам. [14] [1]

Застосування методів газової хроматографії у повсякденній практиці лабораторій вимагає не тільки технічної підготовки персоналу, але й розуміння регламентованих процедур відповідно до чинних нормативних актів. [14] [13] Наприклад, типовий цикл аналізу має бути задокументований у вигляді протоколу, який фіксує кожен етап: дату відбору проби, час аналізу, параметри роботи приладу, калібрувальні значення, контрольні зразки, результати вимірювань.

Показовим є те, що багато лабораторій зараз прагнуть відповідати не лише технічним вимогам стандартів ISO, а й принципам належної лабораторної практики (GLP – Good Laboratory Practice). Це

означає, що в методику аналізу природного газу включаються додаткові етапи перевірки, дублювання результатів, верифікації методів і перехресного контролю між різними приладами. [14] Такий підхід не лише підвищує достовірність аналізу, але й сприяє загальній інтеграції лабораторних систем у великі підприємства.

На підприємствах, що займаються транспортуванням природного газу (газотранспортні системи), хроматографічні вимірювання проводяться безперервно. [14] На кожному вузлі обліку встановлюються автоматизовані газові хроматографи, які передають результати в SCADA або інші автоматизовані системи. [14] Дані щохвилини оновлюються, що дозволяє оперативно виявляти зміни у складі газу та здійснювати точний розрахунок енергетичного еквіваленту. [14]

Також у практиці аналізу часто виникає потреба в ідентифікації невідомих домішок або побічних речовин. У таких випадках застосовуються методи порівняльного аналізу з бібліотеками хроматограм або сполучення ГХ з іншими методами, наприклад, мас-спектрометрією (GC-MS). Таке комбіноване використання розширює можливості аналізу та дозволяє визначати навіть мікрокількості домішок у природному газі, що критично при експлуатації газових турбін або котлів. [14]

Ще одним важливим аспектом є адаптація методики аналізу до нових джерел газу. [14] З поширенням видобутку сланцевого газу, біогазу та газу з альтернативних джерел виникає потреба у перегляді стандартних процедур. [14] Такі види газу можуть містити незвичні компоненти, високий рівень вологи або сірки, що потребує додаткових етапів очищення та модифікації хроматографічного обладнання. [14]

Загалом, методика аналізу природного газу за допомогою ГХ повинна постійно адаптуватися до викликів часу, змін у нормативному полі, появи нових видів палива. [14] Саме тому сучасні лабораторії інвестують у навчання персоналу, оновлення програмного забезпечення, модернізацію приладів. Сьогодні автоматизовані системи обробки даних дозволяють звести до мінімуму людський фактор і забезпечити сталість результатів.

Нарешті, однією з вимог міжнародного стандарту ISO є наявність системи оцінки відповідності. Тобто всі етапи, від калібрування до розрахунку похибок, повинні бути перевірені, задокументовані та архівовані. Без цього результат не може вважатися юридично дійсним. Вимоги ISO базуються не лише на наукових принципах, а й на практичній необхідності уніфікації процедур між країнами, лабораторіями, підприємствами. Це дозволяє забезпечити справедливу комерційну взаємодію, унеможливити маніпуляції з якістю газу. [14]

Таким чином, методика аналізу природного газу, регламентована стандартами ISO 6974 та ISO 6976, є складною, багаторівневою процедурою, яка поєднує технічні, метрологічні, організаційні та інформаційні аспекти. [14] [12] [10] Вона не обмежується лише вимірюванням, а охоплює повний цикл — від пробовідбору до формування аналітичного звіту. [1]

Крім безпосередньо технологічних аспектів, методика аналізу природного газу включає також важливі організаційні процедури, такі як створення і ведення журналів аналітичного контролю, методичних інструкцій для лаборантів, протоколів калібрування, актів внутрішніх перевірок і аудитів. [14] Зазвичай у лабораторіях ведеться спеціальна документація, де фіксуються усі зміни в обладнанні, оновлення

програмного забезпечення, заміна колонок або детекторів. Це дозволяє простежити історію кожного приладу та забезпечити повну простежуваність результатів аналізу.

Сучасні міжнародні практики передбачають також участь лабораторій у міжлабораторних порівняннях (interlaboratory comparison tests), коли кілька незалежних лабораторій аналізують одну й ту ж контрольну суміш. Порівняння результатів дозволяє виявити відхилення, а також забезпечити міжнародне визнання результатів вимірювань, що особливо важливо при експорті газу або участі в міжнародних контрактах. [14]

Окремо слід зазначити питання стандартизації одиниць вимірювання. Хоча аналіз проводиться в об'ємних або молярних відсотках, усі результати повинні бути приведені до стандартних умов (температури 0 або 15 °C, тиску 101,325 кПа), згідно з вимогами ISO 13443. Це забезпечує уніфікованість результатів та дає можливість їх порівняння між різними лабораторіями, країнами та промисловими системами.

У випадках, коли аналізу піддається газ із нових родовищ або нестандартних джерел, лабораторія повинна провести попередню оцінку відповідності існуючих методик. [14] Наприклад, газ із високим вмістом сірководню може потребувати застосування антикорозійних компонентів в системі відбору проб. [14] А біогаз — додаткової очистки від вологи, двоокису вуглецю або органічних забруднень. [14] Такі особливості повинні бути враховані як у приладовому оснащенні, так і в процедурній частині методики.

Значний акцент також робиться на питаннях безпеки. Газова хроматографія передбачає роботу з горючими газами (водень, метан),

що вимагає суворого дотримання правил вибухозахисту. [14] Прилади повинні мати відповідні сертифікати, бути встановленими у вентиляційних шафах або вибухозахищених зонах. Також персонал повинен пройти інструктаж і мати відповідну кваліфікацію.

Не можна залишити поза увагою роль автоматизованих систем управління якістю (QMS – Quality Management System), які використовуються на багатьох підприємствах. Вони включають не лише технічні вимоги, але й організаційні: навчання персоналу, контроль доступу до приладів, процедури реагування на нестандартні ситуації, алгоритми зберігання даних. Усе це забезпечує високу надійність, простежуваність та довіру до результатів аналізу.

Таким чином, газова хроматографія у контексті методики аналізу природного газу — це не просто набір технічних операцій, а ціла система, що включає підготовку, аналіз, облік, обробку даних, управління ризиками, стандартизацію та правову верифікацію. [14] Кожен з етапів впливає на загальний результат і потребує ретельної уваги з боку фахівців.

Сучасні виклики — зміни у складі газу, поява нових джерел, глобалізація енергетичних ринків — потребують постійного вдосконалення методики. [14] Тому в освітніх закладах, наукових установах та промислових підприємствах важливо підтримувати високу культуру вимірювань, забезпечувати оновлення стандартів, впроваджувати інновації в програмне забезпечення і апаратне забезпечення аналітичних систем.

У підсумку, лише комплексний підхід до методики аналізу природного газу, що базується на стандартах, професіоналізмі персоналу та інноваційності рішень, дозволяє забезпечити точність,

надійність і практичну корисність результатів у будь-яких виробничих або наукових умовах. [14] [1]

В умовах зростаючих вимог до екологічної безпеки та енергоефективності все більшу увагу приділяють точності аналізу природного газу не лише в комерційному, а й в екологічному аспекті. [14] Зокрема, дані про вміст супутніх компонентів, таких як сірководень, аміак або важкі вуглеводні, можуть бути використані для прогнозування утворення викидів, корозії обладнання, накопичення залишкових продуктів згоряння. У зв'язку з цим, в деяких країнах розробляються локальні стандарти, що доповнюють ISO, орієнтовані на екологічну безпеку використання газу. [14]

Також варто відзначити зростання значення газової хроматографії у процесі декарбонізації енергетики. [14] [13] З розвитком водневої енергетики виникає потреба у точному визначенні вмісту водню у газовій суміші, а також контролі за можливими домішками, які можуть впливати на каталітичні реакції у водневих двигунах або паливних елементах. [14] Це відкриває нові горизонти для розвитку методик аналізу, оновлення існуючих стандартів та створення нових регламентів.

З погляду технічного обслуговування, сучасні ГХ-системи все частіше інтегруються у великі IoT-інфраструктури підприємств. Це дозволяє у режимі реального часу отримувати інформацію про стан обладнання, нагадування про необхідність заміни фільтрів, колонок, перевірку калібрувальних сумішей. Такий підхід забезпечує не лише безперебійність вимірювального процесу, а й зменшує витрати на ремонт і підвищує загальну надійність.

Загалом, розвиток методики аналізу природного газу не обмежується лише її стандартизацією. [14] Йдеться про багаторівневу трансформацію галузі: від інструментальної бази до цифрових технологій, від класичних паперових звітів до хмарних платформ з верифікацією даних. Ця трансформація покликана зробити аналіз більш точним, зручним, доступним для всіх учасників енергетичного ринку.

Таким чином, газова хроматографія, як ключовий інструмент контролю якості природного газу, продовжує залишатися в центрі уваги промислових та наукових спільнот. [14] Її методологія розвивається разом із потребами ринку, забезпечуючи баланс між традиціями вимірювань і сучасними технологічними викликами. [1]

1.4 Практичне значення, точність, похибки та перспективи

Газова хроматографія займає провідне місце серед методів аналізу складу природного газу завдяки своїй високій точності, швидкості та можливості одночасного визначення багатьох компонентів. [14] Її практичне значення виходить далеко за межі лабораторних умов: вона є критично важливою для систем комерційного обліку, енергетичного планування, безпеки виробництва та охорони довкілля.

Однією з основних переваг методу є його здатність забезпечити достовірні результати навіть при незначних концентраціях компонентів. Це дозволяє точно розраховувати теплоту згоряння, густину, відносну густину та число Воббе — параметри, які безпосередньо впливають на оплату енергетичних ресурсів та ефективність їх використання.

У промисловій практиці дані, отримані за допомогою ГХ, використовуються для оперативного контролю якості палива, запобігання нештатним ситуаціям, оптимізації процесів згоряння в турбінах і котлах. У газотранспортних компаніях саме газова хроматографія дозволяє виконувати об'єктивний облік при передачі газу між операторами. [14] З цієї причини прилади встановлюються не тільки в лабораторіях, а й безпосередньо на газорозподільних станціях, де здійснюється автоматизований аналіз у реальному часі. [14]

Точність газової хроматографії забезпечується комплексом чинників: стабільністю температурного режиму, каліброваними газовими сумішами, якістю колонок, чистотою газу-носія, а також програмним забезпеченням, яке здійснює інтеграцію піків та обчислення. [14] [13] За умови дотримання методичних вказівок і належного технічного обслуговування, можливо досягти відносної похибки менше 1% для основних компонентів і до 2-3% для компонентів, що містяться в мінімальних кількостях.

Проте, попри високу точність, метод також має свої обмеження і джерела похибки. До основних з них належать: знос колонок, дрейф детектора, варіації температури, нестабільність тиску газу-носія, людський фактор. [14] Саме тому важливо не лише проводити регулярне технічне обслуговування, а й впроваджувати автоматизовані системи самоконтролю, сигналізації та верифікації результатів.

У перспективі, розвиток газової хроматографії пов'язаний із впровадженням нових технологій, таких як мікрохроматографи, які відзначаються компактністю та здатністю працювати у важкодоступних умовах. [14] [13] Також розробляються нові типи детекторів із підвищеною чутливістю, гібридні системи на основі

поєднання ГХ та мас-спектрометрії, алгоритми машинного навчання для автоматичної ідентифікації компонентів.

Таким чином, практичне значення газової хроматографії постійно зростає, а її перспективи є надзвичайно широкими. [14] [13] У поєднанні з цифровими технологіями, інтелектуальними системами аналізу даних та глобальними енергетичними викликами, метод продовжує відігравати ключову роль у розвитку надійної, точної та безпечної енергетичної інфраструктури. [1]

Поглиблюючи аналіз точності, варто звернути увагу на фактори, які визначають межі допустимих похибок. Згідно зі стандартами, що регламентують хроматографічні вимірювання, точність визначається не лише внутрішньою стабільністю приладу, а й умовами експлуатації, станом навколишнього середовища, чистотою газу-носія та попередньою підготовкою проби. [14] Найбільш критичним чинником є температура — її навіть незначні коливання можуть викликати зсув ретенційних часів, що призводить до помилкової ідентифікації піків. Тому всі сучасні хроматографи обладнані термостатованими блоками та мають функцію компенсації температурних змін.

Крім того, для покращення точності активно застосовуються внутрішні стандарти — речовини з відомими характеристиками, які додаються до проби. Це дозволяє калібрувати вимірювання та враховувати похибки, викликані нестабільністю введення зразка або змінами в чутливості детектора. В деяких випадках використовуються автоматичні пробовідбірники, які забезпечують сталість об'єму інжектваного газу, що особливо актуально при аналізі великої кількості зразків. [14]

Особливу увагу слід приділити впливу похибок на результати комерційного обліку. У масштабах великого газорозподільного підприємства навіть незначна похибка у вимірюванні складу газу може призвести до суттєвих фінансових втрат або суперечок між постачальником і споживачем. [14] Саме тому застосування високоточних хроматографів, регулярне калібрування і технічний супровід є економічно обґрунтованим.

Також слід відзначити, що точність хроматографічного аналізу напряму залежить від якості програмного забезпечення. Сучасні аналітичні програми здатні автоматично ідентифікувати компоненти, враховувати фонові сигнали, проводити математичне згладжування пік-функцій та коригування похибок. Водночас, важливо забезпечити відповідність таких програм вимогам стандартів та наявність сертифікатів метрологічної перевірки.

З точки зору практичної значущості, хроматографічний аналіз природного газу дозволяє не тільки визначати його якість, а й відслідковувати динаміку змін у складі за тривалий період. [14] Це особливо корисно при аналізі змішування газів із різних джерел, виявленні аномалій, оптимізації режимів спалювання, або при оцінці ефективності роботи газоочисних установок. [14]

У контексті майбутнього розвитку газової хроматографії слід очікувати подальшого вдосконалення детекторів. [14] [13] Зокрема, вже зараз ведуться розробки щодо використання фотонно-іонізаційних детекторів нового покоління, які мають більшу чутливість до вуглеводнів та здатні забезпечити глибший аналіз важких фракцій. Водночас, розвивається напрямок дистанційного керування

хроматографами через мобільні додатки або SCADA-інтерфейси, що дозволяє контролювати якість газу з будь-якої точки світу. [14]

Ще однією перспективною галуззю є використання штучного інтелекту для автоматичної інтерпретації хроматограм. За допомогою алгоритмів машинного навчання можна навчити систему розпізнавати складні патерни, прогнозувати появу домішок або виявляти аномальні показники задовго до того, як це зробить оператор. Це відкриває нові горизонти в управлінні якістю та попередженні аварійних ситуацій.

Також варто відзначити роль хроматографії в екологічному моніторингу. Оскільки природний газ — це не лише енергоносіє, а й потенційне джерело викидів вуглекислого газу, метану та інших парникових газів, аналіз його складу стає важливим елементом у звітуванні про вуглецевий слід підприємств. [14] Таким чином, точність вимірювання газу набуває не лише економічного, а й екологічного значення. [14]

У підсумку, можна стверджувати, що точність і надійність газової хроматографії є базовими характеристиками, від яких залежить успішне функціонування систем енергопостачання, безпека промисловості, достовірність комерційного обліку та відповідність екологічним нормам. [14] [13] Перспективи розвитку цієї галузі пов'язані не тільки з удосконаленням апаратної бази, а й з інтеграцією цифрових технологій, автоматизацією процесів та застосуванням інтелектуальних алгоритмів обробки даних. [1]

Слід окремо розглянути приклад застосування хроматографічного аналізу в реальних умовах газотранспортного підприємства. [14] Уявімо ситуацію, коли між двома регіонами країни здійснюється передача природного газу, і обидві сторони мають бути

впевнені у якості палива, яке надходить. [14] У таких випадках на обох кінцях трубопроводу встановлюються газові хроматографи, які працюють синхронно і забезпечують повну картину складу газу в реальному часі. [14] Якщо система виявляє раптові відхилення — наприклад, підвищення вмісту вологи чи домішок — автоматично вмикається система сигналізації, що дозволяє вчасно вжити заходів і уникнути пошкодження обладнання чи порушення договорів постачання.

Також показовим є використання ГХ у виробничих умовах, зокрема на підприємствах з переробки природного газу. [14] Тут важливо відстежувати склад не тільки основного газового потоку, а й побічних продуктів, які утворюються в процесі фракціонування. [14] Наприклад, при виділенні зрідженого природного газу (LNG) газова хроматографія дозволяє контролювати якість кожної фракції, що надходить на охолодження, транспортування чи утилізацію. [14]

Не менш важливим є застосування ГХ у наукових дослідженнях. При вивченні поведінки газових сумішей за різних температур і тисків, метод дозволяє ідентифікувати механізми взаємодії між молекулами, прогнозувати фазові переходи, створювати точні моделі термодинаміки. [14] Таким чином, хроматографія не тільки підтримує прикладні задачі, а й слугує фундаментальним інструментом у розвитку фізики та хімії газових систем. [14]

Крім того, важливо враховувати вплив людського фактора на результати вимірювань. Незважаючи на рівень автоматизації, значна частина відповідальності залишається на операторі. Саме оператор приймає рішення про повторний аналіз, перевірку калібрування, налаштування приладу, оцінку коректності піків. Від його досвіду та

уважності залежить, наскільки точно буде ідентифіковано кожен компонент. Тому підготовка персоналу, регулярне підвищення кваліфікації та робота з методичними матеріалами — невід’ємна частина забезпечення точності.

Системи контролю якості в лабораторіях, що виконують хроматографічний аналіз, зазвичай побудовані на багаторівневому підході. Це включає первинну верифікацію результатів (автоматичну та візуальну), регулярну участь у раундах міжлабораторного порівняння, ведення архіву хроматограм, аудит дій операторів. Кожна хроматограма, що зберігається у базі даних, може бути переглянута при виникненні спірних ситуацій або потребі в аналізі змін у довгостроковому періоді.

На перспективу, одним із ключових напрямів розвитку є інтеграція хроматографічних даних у хмарні платформи. Це дозволить централізовано керувати інформацією з декількох об’єктів, забезпечити захист даних, контроль доступу та зручність аналітики. Застосування технологій блокчейну для фіксації результатів також розглядається як перспективне рішення для забезпечення юридичної достовірності вимірювань у сфері міжнародної торгівлі енергоресурсами.

В умовах глобальних викликів — зміни клімату, енергетичної трансформації, зростання попиту на альтернативні джерела енергії — хроматографія може адаптуватися до нових потреб. Зокрема, зростає потреба в аналізі водневих сумішей, біогазу, газів із додаванням синтетичних компонентів. [14] Усе це вимагає розширення методичних можливостей, підготовки нових довідкових таблиць, оновлення стандартів та модернізації приладів.

Таким чином, хроматографія не лише утримує свої позиції як базовий аналітичний метод, а й демонструє здатність до гнучкої адаптації, інтеграції в цифрове середовище та підвищення значущості в енергетичному секторі. Її подальший розвиток забезпечить ще більшу точність, надійність, гнучкість і ефективність у задоволенні зростаючих потреб промисловості, науки та суспільства загалом. [1]

Крім того, актуальним є питання взаємодії хроматографії з системами прогнозування. У великих енергетичних компаніях результати хроматографічного аналізу часто стають вхідними даними для моделей попиту на газ, планування навантаження, моніторингу споживання. [14] Такі моделі дозволяють не лише виявити закономірності у змінах складу газу, але й прогнозувати майбутні тенденції. [14] Наприклад, якщо в певному регіоні спостерігається систематичне зниження теплоти згоряння газу, це може бути сигналом про зниження якості джерел або вплив сторонніх факторів — від змішування з повітрям до погіршення очищення. [14]

Також важливою є роль хроматографії в антикризовому управлінні. У випадках виникнення аварійних ситуацій, витоків, забруднення систем або підозрілих змін у показниках, хроматографи дозволяють оперативно визначити джерело проблеми. Миттєве отримання результатів та можливість порівняти їх із історичними даними дозволяють швидко приймати рішення, моделювати наслідки та реалізовувати стратегії реагування.

З огляду на швидкість розвитку ІТ-сфери, інтеграція хроматографічних даних у загальні інформаційні системи підприємства (MES, ERP, SCADA) відкриває нові можливості для автоматизованого звітування, збереження даних, контролю якості та безпеки на всіх

рівнях виробництва. Особливо важливо це для підприємств критичної інфраструктури, де кожна затримка у виявленні невідповідностей може коштувати дорого.

Також варто відзначити перспективи розширення функціоналу самих хроматографів. Виробники все активніше інтегрують функції діагностики, автотестування, нагадування про обслуговування та інтелектуальні інтерфейси користувача. Це робить прилади більш зручними у користуванні, знижує залежність від висококваліфікованого персоналу та забезпечує стабільність вимірювального процесу навіть у складних умовах.

У підсумку, значення газової хроматографії у сучасному світі виходить далеко за межі простої ідентифікації компонентів природного газу. [14] [13] Це універсальний інструмент, який поєднує в собі точність, оперативність, технологічну гнучкість і перспективу інтеграції з глобальними цифровими екосистемами. Її розвиток безпосередньо пов'язаний із майбутнім енергетики, охорони довкілля, економіки та безпеки. [1]

РОЗДІЛ 2. Порівняння сучасних газових хроматографів: «КРИСТАЛЛ-2000М» та CHROZEN GC

2.1 Історичний розвиток та вдосконалення газової хроматографії

Газова хроматографія як один із найефективніших аналітичних методів виникла у середині ХХ століття, однак її коріння сягають у глибину першої половини століття. Ідея розділення складних сумішей шляхом їх переміщення через сорбційне середовище була запропонована ще у 1903 році російським ботаніком М.С. Цветом, який вперше застосував хроматографічний підхід до розділення пігментів хлорофілу. Проте застосування цієї концепції до газових сумішей стало можливим лише після Другої світової війни [1]. [14]

У 1952 році Джеймс і Мартін (Велика Британія) вперше створили лабораторний прототип газового хроматографа. [14] Їхні роботи стали базовими для подальшого розвитку приладів, які аналізують склад летких сумішей. Перші ГХ-прилади були примітивними — мали ручну систему керування потоком, температурою та відсутність автоматичних детекторів. Проте навіть такі конструкції дозволили здійснювати якісний аналіз органічних речовин у повітрі, природному газі, нафті тощо [2]. [14]

У 1960–1970-х роках газова хроматографія почала активно входити в науково-дослідні лабораторії та промисловість. [14] У цей період з'явилися перші детектори теплопровідності (TCD), що дозволили проводити аналіз за принципом відмінності теплопровідності між газом-носієм та аналітом. [14] Паралельно розвивалися полум'яно-іонізаційні детектори (FID), які стали основою аналізу вуглеводневих сумішей. У СРСР широко використовувались

прилади серій «Цвет», «Люмі», а згодом — «Кристалл», що стали типовими в обліку газів у промисловості та енергетичному секторі [3]. [14]

Наступною віхою стало впровадження капілярних колонок і мікрообчислювальних блоків у 1980–1990-х роках. З'явилися напівавтоматичні системи калібрування, електронне регулювання температури, перші версії програмного забезпечення для зберігання та обробки хроматограм. Це дозволило збільшити чутливість, відтворюваність і обсяг даних, що оброблялися в режимі реального часу. У країнах пострадянського простору ці технології впроваджувалися повільніше через економічні обмеження, однак ГХ-прилади залишалися основним інструментом контролю якості природного газу та викидів у довкілля [3]. [14]

У ХХІ столітті розвиток мікроелектроніки, сенсорики, інтернету речей та програмного забезпечення суттєво змінив вигляд газового хроматографа. [14] Сучасні прилади — це фактично автономні комп'ютеризовані лабораторії, які включають автосамплери, модулі ЕРС (Electronic Pneumatic Control), цифрові детектори з вбудованою діагностикою, сенсорні екрани та web-інтерфейси. Яскравим прикладом таких приладів є ChroZen GC, що об'єднує десятки функцій, недоступних у моделях попереднього покоління [4]. [15]

Крім апаратної частини, важливим аспектом стала стандартизація та метрологічне визнання ГХ-методик. Зокрема, міжнародні стандарти ISO 6974-1:2021 та ISO 6976:2020 регламентують визначення компонентного складу природного газу, теплотворності, густини та числа Воббе на основі хроматографічного аналізу. [14] [12] [10] Це

дозволило уніфікувати підходи до контролю якості газів у Європі, США, Азії, а згодом — і в Україні [5]. [14]

Сьогодні газова хроматографія — це не лише метод аналізу, а ціла система, що забезпечує надійний контроль технологічних процесів, екологічну безпеку, сертифікацію палива та дотримання нормативів. [14] Вона активно використовується у суміжних науках — екотоксикології, біоенергетиці, криміналістиці. Висока точність, автоматизація, можливість мультианалізу, сумісність із сучасним ПЗ роблять її незамінним інструментом для державних, промислових та наукових установ [5].

У країнах колишнього Радянського Союзу розвиток газової хроматографії мав свою унікальну траєкторію. [14] [13] Через обмежений доступ до західних технологій і ліцензій, вітчизняні наукові установи й заводи самостійно створювали й удосконалювали аналітичні системи. Хроматографи серії «Цвет», «ХМ», а згодом «Кристалл» забезпечували базові потреби аналізу природного газу, вуглеводневих сумішей, а також контроль чистоти повітря на виробництвах. [14] Висока механічна надійність, простота використання та доступність зменшених моделей сприяли широкому поширенню цих приладів у лабораторіях нафтогазової, хімічної та екологічної галузей [3]. [14]

З початком 2000-х років на ринку з'являються китайські та південнокорейські моделі, які поєднують функціональність із нижчою вартістю. Це суттєво розширило доступ лабораторій у країнах із середнім рівнем доходу до сучасного аналітичного обладнання. ChroZen GC став одним із таких рішень: за відносно помірну вартість він пропонує повну автоматизацію, модульність і відповідність

міжнародним вимогам. [15] Завдяки інтуїтивному інтерфейсу та високій точності прилад активно впроваджується в лабораторіях Європи, Центральної Азії та Близького Сходу [4].

У Європі й США газова хроматографія є ключовим методом контролю якості газопостачання. [14] Стандарти EN ISO вимагають регулярного калібрування приладів, валідації методик, точного визначення основних компонентів — метану, етану, азоту, діоксиду вуглецю. Крім того, важливим елементом є оцінка супутніх компонентів — слідів сірковмісних домішок, що мають токсичний характер. Газова хроматографія зберігає провідну позицію в цій сфері завдяки точності, повторюваності та відповідності міжнародним вимогам [5].

Окрему роль відіграє хроматографія в екологічному моніторингу. Сучасні прилади дозволяють аналізувати наявність летких органічних сполук (ЛОС), викидів метану, забруднюючих речовин у повітрі робочих зон, а також у навколишньому середовищі. Зростання уваги до кліматичних змін, норм Європейського зеленого курсу та ESG-політик призвело до стрімкого зростання попиту на точні, надійні хроматографічні системи, особливо портативного або стаціонарного типу для довготривалого моніторингу [5].

Історія газової хроматографії — це приклад еволюції від простого лабораторного інструменту до високотехнологічної, автономної системи. [14] [13] Її шлях демонструє здатність науки адаптуватися до викликів промисловості, екології, енергетики та безпеки. У наш час ГХ є основою сертифікації природного газу, оцінки альтернативних джерел енергії (біогазу, водню), а також важливим засобом наукового дослідження нових матеріалів, процесів та речовин.

[14] Її універсальність і надійність роблять метод незамінним і надалі [5].

Історія газової хроматографії почалася з необхідності розділення складних сумішей летких речовин, що стало можливим завдяки роботам радянського вченого М. [14] [13]С. Цвета. Хоча його метод стосувався рідинної хроматографії, саме він поклав початок методам поділу речовин на основі різного ступеня взаємодії з нерухомою фазою. Справжній прорив стався у 1952 році, коли Джеймс та Мартін представили першу робочу модель газового хроматографа. [14] Їхній пристрій дозволив значно пришвидшити аналіз складних сумішей і заклав основу сучасного ГХ-аналізу [1].

У 1960–70-х роках відбулося масове впровадження ГХ у промислові лабораторії. Зокрема, з'явилися детектори теплопровідності та полум'яно-іонізаційні детектори, що розширило можливості аналізу газів та парів. [14] У Радянському Союзі хроматографи почали використовуватися в енергетиці, нафтохімії та у санітарно-гігієнічних дослідженнях. Такі прилади, як «Цвет-100» та перші моделі «Кристалл», забезпечували точність на рівні, достатньому для контролю газових потоків у комунальній та виробничій сферах [2]. [14]

У 1980–90-х роках спостерігається перехід від повністю ручних систем до приладів з елементами автоматизації: електронні регулятори, термостати, внутрішнє ПЗ. Стандартизація методів аналізу призвела до широкого впровадження хроматографії у метрологічну практику. Після розпаду СРСР, приладова база в Україні здебільшого спиралась на застарілі системи, однак з появою нових імпорتنих аналогів — тенденція змінилася. Зокрема, у 2000-х роках почався перехід до

цифрових інтерфейсів, автосамплерів і систем із програмованим температурним градієнтом [3].

Нині сучасні газові хроматографи — це багатофункціональні аналітичні комплекси, інтегровані в мережі лабораторного контролю, здатні працювати цілодобово, дистанційно й автоматизовано. [14] Вони здатні одночасно контролювати десятки компонентів із похибкою в межах ppm і ppb, що надзвичайно важливо для енергетичної, екологічної та фармацевтичної галузей [4].

2.2 Конструктивні особливості та функціональні можливості газового хроматографа «Кристалл-2000М»

$$X_i = \frac{A_i}{A_{sum}} \cdot 100\%$$

де A_i — площа піку компонента,

A_{sum} — сума площ усіх піків.

Газовий хроматограф «Кристалл-2000М» є результатом еволюції радянської школи хроматографії, адаптований під сучасні потреби лабораторій, але водночас зберіг конструктивні ознаки класичних приладів. [9] Прилад побудований за модульною схемою: основний корпус із вбудованим термостатом, панель керування, детекторні блоки та секції для колонок. Ця модульність дозволяє гнучко адаптувати систему під потреби користувача [2].

Кристалл-2000М підтримує одночасне підключення до чотирьох детекторів. [9] Найчастіше застосовуються детектори теплопровідності (ДТП) і полум'яно-іонізаційні (ПІД), які забезпечують широкий динамічний діапазон виявлення — від 0.01% до десятків відсотків. Завдяки використанню високоякісних матеріалів, детектори

характеризуються стабільною чутливістю та низьким рівнем шуму, що є критично важливим для аналізу природного газу [3]. [14]

Система подачі газу включає регулятори витрати та тиску, газорозподільну арматуру, фільтри. [14] Всі елементи потребують ручного налаштування та періодичної перевірки. Це створює обмеження щодо точності відтворення методик. У порівнянні з сучасними ЕРС (електронними контролерами тиску), які працюють у приладах останнього покоління, така реалізація виглядає застарілою, хоча й залишається надійною [2].

Панель управління хроматографа складається з кнопок, світлодіодних індикаторів та цифрового дисплея. Налаштування режимів роботи виконується вручну, шляхом введення параметрів через клавіатуру, що потребує кваліфікації та досвіду. Дані аналізу передаються на комп'ютер за допомогою зовнішнього ПЗ (наприклад, NetChrom), яке дозволяє побудову хроматограм, інтеграцію піків та розрахунок концентрацій [4].

Незважаючи на конструктивну архаїчність, прилад широко застосовується у лабораторіях з обмеженим фінансуванням, де критичне значення має не автоматизація, а стабільність роботи та доступність комплектуючих. Крім того, наявність української/російської документації, звичних схем обслуговування та простота ремонту зробили «Кристалл-2000М» популярним у лабораторіях обліку природного газу в Україні, Казахстані, Білорусі [3]. [14] [9]

2.3 Сучасна автоматизація та точність вимірювання: газовий хроматограф ChroZen GC

ChroZen GC — це сучасна аналітична система нового покоління, що поєднує в собі інноваційні технології, високу точність та повну автоматизацію процесу газового аналізу. [14] [15] Розроблений компанією Young In Chromass (Південна Корея), цей прилад відповідає світовим стандартам якості, включаючи ISO 6974, ISO 6976 та ISO 17025, що робить його придатним для офіційного використання у метрологічних та сертифікованих лабораторіях [4]. [12] [10]

Однією з ключових переваг ChroZen GC є наявність системи EPC (Electronic Pneumatic Control), яка забезпечує електронне регулювання тиску та витрати газу з надзвичайною точністю. [14] [15] Це дозволяє зменшити похибки, пов'язані з нестабільністю подачі газу, та забезпечити повну повторюваність хроматографічних умов. [14] Відсутність ручного втручання на цьому етапі мінімізує людський фактор і підвищує надійність результатів [5].

Інтерфейс користувача реалізовано через сенсорну панель із кольоровим дисплеєм, а також за допомогою віддаленого підключення до комп'ютера через Ethernet або Wi-Fi. Прилад підтримує роботу із сучасним програмним забезпеченням YL-Clarity CDS, яке забезпечує широкі можливості зберігання даних, обробки, створення шаблонів, графіків, калібрувальних кривих і інтеграції в єдині лабораторні інформаційні системи (LIMS) [5].

ChroZen GC дозволяє встановлювати до 4 детекторів одночасно, зокрема ПД, ДТП, терміонні, електронозахоплюючі, NPD та FPD. [15] Це розширює сферу застосування приладу: від аналізу природного газу та сумішей вуглеводнів до детекції залишків пестицидів, летких

органічних сполук та токсичних речовин. [14] Стабільність роботи приладу протягом тривалого часу підтверджується заводськими даними: відхилення піків на контрольній хроматограмі не перевищує 0.1% протягом 24 годин [6].

Автоматизований термостат для колонок забезпечує стабільну температуру з точністю до ± 0.01 °C, що критично важливо для відтворення методик. Автосамплер дозволяє вводити до 100 проб без участі оператора, що суттєво зменшує навантаження на персонал. Також ChroZen GC оснащений системою автоматичної діагностики, що повідомляє про помилки, заміну витратних матеріалів або зміну параметрів, що виходять за межі допустимих [4]. [15]

Газовий хроматограф «Кристалл-2000М» є прикладом класичної школи аналітичного приладобудування. [9] Його конструкція базується на багаторічному досвіді проектування аналогових і частково цифрових пристроїв, здатних до проведення якісного та кількісного аналізу газових сумішей. [14] Прилад розроблено з орієнтацією на надійність, зручність технічного обслуговування та адаптованість до різних умов експлуатації, включно з лабораторіями, розташованими у складних кліматичних зонах [2].

Корпус приладу має суцільнометалеву конструкцію, що забезпечує його термостійкість і стійкість до зовнішніх механічних впливів. Центральним елементом системи є термостат, у якому розміщено хроматографічні колонки. Температурний режим термостата встановлюється вручну за допомогою вбудованих регуляторів та підтримується на заданому рівні з точністю до ± 1 °C. Для потреб розширеного аналізу колонок може бути кілька — як капілярних, так і заповнених. Це дозволяє налаштовувати прилад під

специфіку задачі: аналіз природного газу, нафтових фракцій, промислових викидів тощо [3]. [14]

Система подачі проби в «Кристалл-2000М» включає: блок ручного введення проби, кранову систему, регулятори потоку та напрямку руху газу. [14] [9] Проба подається за допомогою шприца, автоматичного дозатора або системи циркуляції через петельний ввід. Газ-носії (гелій, азот або водень) надходить з балона під тиском, регулюється механічними редукторами. Вся ця система працює без електронних пневматичних регуляторів, що з одного боку ускладнює точне дозування, але з іншого — забезпечує простоту обслуговування і меншу вартість експлуатації [2].

Детекторна частина є ключовою для кожного хроматографа. У «Кристалл-2000М» використовуються кілька типів детекторів. [9] Найбільш поширений — детектор теплопровідності (ДТП), який дозволяє визначати неорганічні компоненти (наприклад, азот, вуглекислий газ). [14] Для виявлення вуглеводнів застосовують полум'яно-іонізаційний детектор (ПІД), що працює на основі іонізації компонентів у полум'ї водень-повітря. Прилад також підтримує встановлення терміонного та електронозахоплюючого детектора (ECD), що значно розширює його функціональність [3].

Налаштування режимів роботи здійснюється через фізичну панель керування, що складається з кнопок, дисплея та перемикачів. Це надає користувачу повний контроль над усіма параметрами, але потребує високої кваліфікації персоналу. Програмне забезпечення, таке як NetChrom, дозволяє зчитування хроматограм, зберігання результатів, інтеграцію піків та розрахунок концентрацій, однак

функціонально поступається сучасним цифровим системам управління, як-от YL-Clarity CDS [4].

Хроматограф можна підключити до зовнішнього ПК через інтерфейси RS-232 або USB, що дозволяє обмінюватися даними, але вимагає ручної калібровки, введення методів, збереження результатів тощо. Незважаючи на відсутність сенсорного інтерфейсу або віддаленого доступу, прилад підтримує базову автоматизацію: автоматичне прогрівання, програмоване вимкнення, аварійне блокування температури. Ці функції роблять прилад придатним для застосування у контексті щоденного лабораторного контролю [3].

На практиці «Кристалл-2000М» показує хорошу стабільність роботи, точність результатів ($\pm 1-2\%$), що відповідає вимогам багатьох виробничих лабораторій. [9] Проте з огляду на тенденції до цифровізації, автоматизації, дистанційного контролю та стандартизації, такі прилади все більше розглядаються як перехідні або резервні варіанти. Їх основна перевага — надійність, ремонтпридатність та низька вартість, а головний недолік — залежність від людського фактору та обмежений функціонал [4].

2.3 Сучасна автоматизація та функціональні можливості газового хроматографа ChroZen GC

ChroZen GC — це високотехнологічний газовий хроматограф нового покоління, розроблений південнокорейською компанією Young In Chromass. [14] [15] Його конструкція та функціонал демонструють сучасний підхід до вирішення задач аналітичної хімії та контролю якості газових сумішей. [14] Прилад створено з урахуванням вимог міжнародних стандартів ISO 6974, ISO 6976, ISO 17025 та GMP, що

дозволяє застосовувати його у сертифікованих лабораторіях, на виробництвах і в екологічному моніторингу [3]. [12] [10]

Однією з головних переваг ChroZen GC є модульна архітектура. [15] Це означає, що користувач має можливість самостійно конфігурувати пристрій відповідно до потреб аналізу. Залежно від типу зразків, мети дослідження та кількості компонентів, що аналізуються, можна встановити до чотирьох детекторів одночасно. Серед доступних: ПІД (полум'яно-іонізаційний), ДТП (теплопровідності), ECD (електронозахоплюючий), FPD (полум'яно-фотометричний) та NPD (азот-фосфорний) [4].

Ключовим елементом є система EPC (Electronic Pneumatic Control), яка дозволяє точно та стабільно контролювати витрату газу-носія, тиск, температуру та інші параметри без участі оператора. [14] Завдяки цьому забезпечується відтворюваність методів, мінімізується похибка та виключається людський фактор. Точність подачі тиску становить до 0.001 psi, що значно перевищує можливості ручних регуляторів [4].

Інтерфейс користувача реалізовано через великий кольоровий сенсорний екран з інтуїтивно зрозумілим меню, що підтримує багатомовність. Окрім цього, прилад оснащено Ethernet-портом, через який можна здійснювати віддалене керування, перегляд результатів, налаштування методів та калібрування. Всі дані зберігаються у внутрішній пам'яті або можуть бути перенесені через USB-носії [4].

Важливим компонентом є програмне забезпечення YL-Clarity CDS. Воно забезпечує повний цикл аналітичної обробки: від запису хроматограм до формування сертифікатів та графіків. Крім того, є

функції автоматичної інтеграції піків, побудови калібрувальних кривих, обчислення невизначеностей, що відповідає вимогам ISO [3].

ChroZen GC підтримує роботу з автосамплером — пристроєм, що автоматично подає до 110 зразків послідовно без втручання оператора. [15] Це критично важливо у високонавантажених лабораторіях, де необхідна автоматизація. Також є можливість поєднання з системами headspace та термодеструкторами для аналізу твердих і рідких зразків, що містять леткі компоненти [4].

Температурна стабільність ChroZen GC підтверджується точністю термостату до ± 0.01 °C, що суттєво підвищує якість аналізу, особливо при визначенні низькокиплячих компонентів. Крім того, наявна система активного охолодження дозволяє швидко змінювати методики, виконувати програмовані цикли, не очікуючи на природне охолодження [3].

Велика увага приділяється безпеці. Прилад оснащено функціями самодіагностики, аварійного відключення, звуковими та візуальними сигналами при виході параметрів за межі допустимого діапазону. Це робить ChroZen GC придатним до роботи в безперервному режимі у виробничому середовищі [3]. [15]

Таким чином, ChroZen GC є зразком сучасної концепції «розумної аналітики». [15] Його точність, автоматизованість, модульність та відповідність міжнародним стандартам роблять прилад не просто інструментом, а повноцінною платформою для наукових досліджень, виробничого контролю та екологічного моніторингу [4].

2.4 Порівняльна характеристика приладів, точність, похибки та перспективи розвитку хроматографії

У цьому підрозділі буде проведено системний аналіз двох газових хроматографів — «Кристалл-2000М» і «ChroZen GC» — з акцентом на функціональність, точність, зручність експлуатації, а також перспективи розвитку хроматографічних технологій. [14] [9] [15] Обидва прилади належать до різних поколінь аналітичної техніки: перший представляє класичний аналоговий підхід із частковою цифровою підтримкою, тоді як другий — сучасну комп'ютеризовану систему повного циклу з автоматизованим управлінням та аналітикою [3][4].

Починаючи з конструктивних особливостей, «Кристалл-2000М» побудований на принципах механічної надійності та простоти. [9] Він не вимагає складного технічного обслуговування, але водночас значно поступається за точністю та відтворюваністю параметрів. Натомість «ChroZen GC» вирізняється модульною архітектурою, високою інтеграцією електронних компонентів і розширеним набором детекторів, що дає змогу значно ширше варіювати методики аналізу [4]. [15]

У контексті точності та похибок аналізу, ChroZen GC має перевагу завдяки наявності ЕРС-модулів (електронне регулювання пневматичних параметрів) та систем самодіагностики. [15] Це дозволяє підтримувати тиск, температуру та витрату газу з точністю до тисячних частин одиниці. [14] Для порівняння, у Кристалл-2000М всі ці параметри контролюються вручну, що призводить до підвищеного рівня систематичної та випадкової похибки, особливо в умовах багаторазового повторення аналізу [3]. [9]

Функціональні відмінності також відчутні. У ChroZen GC реалізовано повний цифровий контроль через сенсорний дисплей, віддалене керування, обробку даних за допомогою сучасного ПЗ, автосамплери та системи зберігання результатів. [15] Це суттєво підвищує продуктивність та знижує залежність від людського чинника. У «Кристалл-2000М» процес аналізу частково механізований, однак більшість дій — введення проби, запуск, фіксація часу — виконується вручну, що підвищує ймовірність помилки та знижує продуктивність [3]. [9]

Експлуатаційна зручність приладів також значно відрізняється. У ChroZen GC кожен компонент має окрему діагностику, зручне меню та можливість зміни параметрів у реальному часі. [15] У Кристалл-2000М користувач змушений вручну перевіряти й налаштовувати температуру, тиск і витрату, а також вести ручну документацію або використовувати зовнішнє програмне забезпечення з мінімальним функціоналом. [9] Це робить ChroZen GC значно ефективнішим у контексті сучасних вимог до автоматизації лабораторій [4]. [15]

Що стосується економічної ефективності, обидва прилади мають свої плюси. «Кристалл-2000М» є значно дешевшим у придбанні та обслуговуванні. [9] Він ідеально підходить для умов обмеженого бюджету, резервного або польового використання. Однак у довгостроковій перспективі ChroZen GC виправдовує свою вартість завдяки економії часу, підвищеній продуктивності, точності та надійності. [15] До того ж, його масштабованість дозволяє підлаштовуватися під нові завдання без капітальних витрат [3].

Загалом, порівняльна характеристика свідчить про перехід хроматографії до епохи інтелектуальних аналітичних систем. Якщо

Кристалл-2000М репрезентує традиційний підхід — ручне керування, простота, обмежена автоматизація, — то ChroZen GC — це майбутнє: автоматизована точність, дистанційне керування, інтеграція з базами даних і стандартами якості [3][4]. [9] [15]

У світлі розвитку технологій можна прогнозувати подальшу еволюцію ГХ-систем: поява компактних переносних приладів, інтеграція зі смартфонами та хмарними обчисленнями, зниження витрат на експлуатацію та розширення діапазону аналізованих компонентів. Зокрема, очікується впровадження штучного інтелекту для інтерпретації хроматограм, автоматичної ідентифікації невідомих речовин та самонавчання систем на основі попередніх даних [5].

Таким чином, газова хроматографія знаходиться на межі нової фази розвитку. [14] Завдяки поєднанню наукового підходу, інженерного вдосконалення та цифрової трансформації вона продовжує залишатися головним методом аналізу природного газу, екологічного моніторингу та біоенергетичних досліджень [5]. [14]

Для глибшого розуміння різниці між «Кристалл-2000М» та ChroZen GC доцільно провести порівняння за критеріями, які мають суттєве значення для лабораторної практики: точність вимірювань, швидкість аналізу, рівень автоматизації, вимоги до персоналу, зручність інтерфейсу, стабільність результатів, технічна підтримка та відповідність стандартам. [9] [15] У таблиці нижче наведено узагальнене зіставлення характеристик двох приладів.

Таблиця 1 – Порівняльна характеристика «Кристалл-2000М» та ChroZen GC

Параметр	Кристалл-	ChroZen GC
-----------------	------------------	-------------------

	2000M	
Точність контролю тиску	±0.5 psi	±0.001 psi
Тип керування	Ручне	Електронне
Автоматизація	Низька	Висока
Кількість детекторів	1–2	до 4
Доступність автосемплера	Немає	Є
Інтерфейс	Кнопки/р учки	Сенсорний
Збереження даних	Зовнішнє ПЗ	Внутрішня пам'ять, USB, Ethernet
Віддалене керування	Немає	Є
Програмне забезпечення	Обмежен е	YL-Clarity CDS
Вартість (орієнтовно)	Нижча	Вища
Вимоги до персоналу	Високі	Помірні
Відповідність ISO	Часткова	Повна

Як видно з таблиці, ChroZen GC забезпечує суттєво вищу точність і відтворюваність аналітичних результатів завдяки сучасним електронним модулям. [15] Також він підтримує автоматичне

калібрування, що усуває помилки, характерні для ручного введення. У свою чергу, Кристалл-2000М залишається придатним у навчальних цілях, у польових умовах або для резервного аналізу [3][4]. [9]

Досвід експлуатації обох приладів у лабораторіях різного профілю підтверджує, що ключовим фактором є не лише технічна специфікація, а й людський фактор. У випадку з ChroZen GC завдяки інтуїтивному інтерфейсу й автоматизації зменшується навантаження на лаборанта. [15] Це знижує ризик помилок і підвищує ефективність роботи лабораторії в цілому. У той же час, оператору Кристалл-2000М потрібен значно вищий рівень підготовки, щоб підтримувати коректну роботу [4]. [9]

З огляду на вимоги сучасної промисловості, ChroZen GC є більш адаптованим до цифрових реалій. [15] Його легко інтегрувати в корпоративну мережу лабораторії, здійснювати моніторинг у реальному часі, передавати результати на сервери для подальшої обробки або архівування. Це дозволяє оптимізувати документообіг, забезпечити контроль якості відповідно до ISO/IEC 17025, а також відповідати принципам Good Laboratory Practice (GLP) [4].

Оцінка надійності обох приладів показує, що Кристалл-2000М завдяки простій механічній конструкції є довговічним і стійким до коливань напруги, механічних навантажень. [9] Проте його недостатня здатність до самодіагностики означає, що дрібні несправності можуть залишатися непоміченими тривалий час. ChroZen GC, навпаки, виявляє більшість відхилень у режимі реального часу, повідомляє оператора та навіть блокує роботу в разі критичної помилки [3]. [15]

Крім того, важливо згадати про екологічний аспект: ChroZen GC має функції зниження енергоспоживання, автоматичне вимкнення в

режимі очікування, зменшене споживання газу-носія та менший вплив на довкілля. [14] [15] У той час як Кристалл-2000М споживає більше ресурсів та не має таких функцій заощадження [5]. [9]

У контексті довготривалих перспектив газова хроматографія розвивається у напрямку мініатюризації, мобільності та хмарної аналітики. [14] Поява портативних приладів, здатних працювати на сонячних батареях або акумуляторах, робить аналіз доступним у польових умовах без лабораторного середовища. Водночас великі прилади, як ChroZen GC, еволюціонують у сторону повної автономії, самоналаштування та взаємодії з базами нормативних документів [5]. [15]

РОЗДІЛ 3. Удосконалення процесу хроматографії природного газу при оцінюванні його якості

3.1 Технічне вдосконалення хроматографічного обладнання

Сучасні газові хроматографи для аналізу природного газу суттєво відрізняються від громіздких і складних приладів минулих десятиліть. [14] Відбулося значне підвищення надійності, чутливості та ергономіки обладнання. По-перше, зменшилися габарити та покращилася конструкція: з'явилися компактні вибухозахищені хроматографи, які можна встановлювати безпосередньо в полі або на виробничих об'єктах без спеціальних укриттів. Зниження маси та крихкості внутрішніх компонентів (клапанів, детекторів) дозволило зменшити потребу в об'ємних термостатованих шафах і спростити монтаж навіть у вибухонебезпечних зонах. Нові моделі споживають менше витратних матеріалів і газів-носіїв, що теж покращує їхню економічність та знижує вимоги до обслуговування. [14] Для прикладу, сучасний польовий хроматограф типу Emerson Rosemount серії 370XA має компактний корпус з вбудованим термостатом, що підтримує стабільність температури колонки навіть в умовах перепадів довкілля, забезпечуючи сталість ретенційних часів.

Важливим напрямом технічного вдосконалення є підвищення чутливості та селективності детекторів. Якщо раніше для визначення домішок сірки (наприклад, H_2S , меркаптанів) доводилося встановлювати окремі аналізатори (наприклад, свинцево-ацетатні стрічкові детектори для сірководню), то нині ці функції можуть виконуватися в самому газовому хроматографі. [14] Класичні стрічкові аналізатори H_2S , хоч і чутливі, мають суттєві недоліки: вони вимірюють лише сірководень, потребують механічного

сервісу та утворюють небезпечні відходи (відпрацьована реактивна стрічка класифікується як токсичний відхід) . Сучасні хроматографи можуть бути обладнані полум'яно-фотометричним детектором (FPD) малої потужності, інтегрованим у систему. Полум'яно-фотометричний детектор виявляє сірковмісні сполуки за їх характерним випромінюванням у синьому полум'ї водню . Раніше установка FPD вимагала великої печі та складних систем безпеки, але тепер з'явилися мініатюризовані μ FPD, які можуть бути вбудовані у польовий хроматографічний блок . Це дозволяє безпосередньо на місці контролю газу визначати навіть сліди сірководню чи меркаптанів з повторюваністю порядку 0,1 ppm . [14] Таким чином, одні пристрій GC здатен замінити декілька вузькоспеціалізованих аналізаторів, забезпечуючи комплексний контроль якості газу (вуглеводневий склад, теплота згоряння, вміст CO_2 , N_2 , H_2S тощо) без значного ускладнення системи. [14]

Крім детекторів, удосконалення торкнулися і колонкових систем та схем поділу. Стандартний метод аналізу природного газу для комерційного обліку – це так званий C_6+ аналіз, коли індивідуально визначаються компоненти від метану (C_1) до пентану (C_5), а всі важчі вуглеводні збираються в одну сумарну фракцію C_6+ . [14] Такий підхід задовольняє потреби обліку енергії, але для деяких задач – наприклад, оцінки температури роси вуглеводнів – його точності може бути недостатньо. Технічно вирішити проблему дозволяють вдосконалені конфігурації колонок. Зокрема, застосовують двоколонні та дводетекторні системи: частина зразка аналізується за швидким шляхом (C_1 – C_5 , CO_2 , N_2), а інша частина паралельно проходить колонку з довшим часом утримання для розділення більш важких компонентів

(гексани, гептани, октани) . У результаті виходить розширений аналіз до C9+ із визначенням групових вмістів C6, C7, C8 та сумарного C9+, що значно покращує точність розрахунку фізичних властивостей газу. [14] За даними Emerson, перехід від стандартного C6+ до розширеного C9+ дозволяє обмежити похибку визначення температури конденсації вуглеводнів до ± 5 °F у порівнянні з повним аналізом до C12

. При цьому вдається уникнути використання полум'яно-іонізаційного детектора (FID) у польових умовах – розширений аналіз виконано на двох надійних детекторах теплопровідності (TCD), які краще пристосовані до роботи на віддалених об'єктах . Отже, сучасні технічні рішення дозволяють отримувати більш повну інформацію про склад газу, не жертвуючи надійністю обладнання. [14]

Ще одним прикладом технічного стрибка в розвитку є поява мініатюризованих газових хроматографів – мікро-ГХ систем. [14] MicroGC – це прилади, в яких використано мікромініатюрні колонки (часто капілярні, виготовлені з кремнієвих чипів), надшвидкий нагрів та дуже чутливі мікро-TCD детектори. Перевагою таких систем є надзвичайно швидкий аналіз: газова проба може бути проаналізована за секунди замість кількох хвилин . [14] Наприклад, портативний Agilent 990 Micro GC здатний давати точний аналіз складу природного газу за лічені секунди, що покращує контроль якості продукції та оцінку її вартості . [14] Подібні пристрої зазвичай постачаються як повністю налагоджені рішення: завантажена методика, калібрування з фабрики і навіть вбудоване програмне забезпечення для розрахунку теплоти згоряння та інших параметрів . Важливо, що простота використання таких мікро-ГХ значно вища, ніж у традиційних лабораторних систем – виробник зазначає, що робота з 990 Micro GC не потребує

високоїкваліфікації оператора . Це стало можливим завдяки автоматизації більшості налаштувань і стабільності мікросистем, які менше піддані зовнішнім впливам. Мобільність microGC дозволяє використовувати їх для оперативного контролю якості газу безпосередньо на свердловинах, газорозподільчих станціях або в польових умовах, де раніше проведення детального аналізу було утрудненим. [14]

Технічне вдосконалення також проявляється у підвищенні зручності обслуговування та зменшенні впливу «людського фактору». Новітні моделі хроматографів мають модульну будову: основні вузли (детектор, дозатор, колонковий блок) виконані у вигляді змінних модулів, які можна швидко замінити в разі виходу з ладу . Така модульність значно скорочує час простою приладу – замість тривалого ремонту достатньо вставити новий модуль, а старий відправити в сервіс. Додатково, у хроматограф вбудовано елементи пробопідготовки, як-от фільтри для видалення пилу та конденсату, а також постійні дроселі потоку, що автоматично підтримують оптимальну витрату газу-носія . [14] В результаті оператору вже не потрібно регулярно вручну підлаштовувати потік чи перейматися засміченням колонки – система піклується про це сама. У реальній роботі це означає стабільнішу базову лінію без «дрейфу» та відсутність паразитних піків, спричинених забрудненнями газу-носія чи стрибками тиску. [14] Наприклад, якщо раніше при аналізі низькоконцентрованих компонентів оператор міг зіткнутися з «примарними» піками через слідивологи або вуглеводнів у лінії носія, то тепер встановлення високочистих фільтрів і автоматичного контролю тиску практично усуває цю проблему . Сучасне обладнання одразу сигналізує про

необхідність технічного обслуговування завдяки системам самодіагностики: прилади відслідковують стан детекторів, витоку газу, ресурс колонок і попереджають персонал про відхилення. [14] Таким чином, технічне вдосконалення газових хроматографів на пряму сприяє підвищенню точності та надійності аналізу природного газу, спрощує роботу оператора та зменшує ризик помилок. [14]

3.2 Автоматизація процесів та програмне забезпечення

Не менш важливим аспектом удосконалення процесу газової хроматографії є розширення можливостей автоматизації та використання сучасного програмного забезпечення. [14] [13]

Автоматизація пронизує всі етапи аналізу – від введення проби до отримання кінцевого звіту. Сучасні хроматографи оснащені електронними системами керування, що дозволяють виконувати аналіз практично без втручання людини.

По-перше, процес дозування та введення проби може бути автоматизований. В лабораторних умовах широко застосовуються автосамплери – пристрої, що автоматично вводять зразки (як рідини, так і газу) до хроматографа за заданою програмою. [14] Для природного газу, який зазвичай відбирається у балони або спеціальні пробовідбірники, існують автоматизовані клапанні вузли введення проби. [14] Оператор може поставити відбір проб на розклад: наприклад, аналіз декількох балонів газу поспіль, де кожна проба запускається в роботу за розкладом, а прилад між аналізами самочищує колонку та готується до наступного запуску. [14] Це особливо корисно, коли треба проаналізувати багато зразків за короткий час або виконати серію повторних вимірювань для статистичної достовірності.

Програмне забезпечення сучасних хроматографів відіграє ключову роль у обробці даних та управлінні приладом. Сучасний інтерфейс користувача значно інтуїтивніший і дружній, ніж у приладів минулих поколінь. Якщо раніше оператор мав вручну налаштовувати детектор, температуру печі, тиск газу-носія і запускати кожен аналіз окремо, то тепер інтерфейс дозволяє створити єдиний метод з усіма параметрами. [14] Більш того, доступні розширені функції: автоматичне опрацювання хроматограм (пошук піків, обчислення площ піків), розрахунок концентрацій за калібрувальними коефіцієнтами та безпосереднє виведення результуючих показників якості газу. [14] Приміром, програмне забезпечення може одразу після аналізу розрахувати теплоту згоряння, відносну густину та індекс Воббе аналізованого газу за міжнародними стандартними формулами (ISO 6976, ГОСТ або GPA). [14] Це виключає можливість помилки при ручному підрахунку та прискорює отримання даних. Виробники також пропонують спеціалізовані модулі ПЗ для розрахунку енергетичних показників – наприклад, для мікро-ГХ Agilent передбачено опцію програмного обчислення калорійності палива. Таким чином, сучасне ПЗ перетворює газовий хроматограф на повноцінну систему аналізу якості: від вимірювання до формування звіту. [14]

Автоматизація процесів підвищує і надійність контролю, впроваджуючи системи моніторингу та дистанційного керування. Багато сучасних газових хроматографів підтримують підключення до мережі або до систем промислової автоматизації (SCADA). [14] У контексті оцінки якості природного газу це означає, що хроматограф на газорозподільчій станції може автоматично передавати результати аналізу до потоку комп'ютерів (обчислювачів об'єму газу) в реальному

часі . [14]Наприклад, на станції комерційного обліку газу дані про склад (вміст метану, азоту, CO₂ тощо)безперервно надходять до електронного коректора, який рахує кількість переданої енергії,компенсуючи зміну складу. [14] У випадку виходу якості газу за встановлені межі, автоматика можеініціювати аварійні дії – аж до перекриття подачі газу з неналежними параметрами . [14]

Дистанційний доступ до хроматографа дозволяє фахівцям контролювати його роботу ізцентральної диспетчерської або навіть через інтернет. Інженер може переглянути хроматограми,перевірити калібрувальні коефіцієнти, запустити діагностичні тести чи змінити налаштуванняметоду, перебуваючи за десятки кілометрів від приладу. Це особливо цінно для віддаленихстанцій, де немає постійного чергування лаборанта. Покращені операторські інтерфейсиприяють зниженню вимог до рівня підготовки персоналу: розробники прагнуть зробитикерування хроматографом зрозумілим навіть для непрофільних спеціалістів . Якзначалося в оглядах, сучасні рішення дозволяють виконувати потрібні дії меншкваліфікованому персоналу, ніж це було традиційно потрібно, без втрати якості аналізу .Автоматизація усуває «ручні» операції, що раніше потребували досвіду: наприклад, калібруваннятепер може виконуватися в автоматичному режимі за розкладом або по команді, коли програма сама підключає еталонну газову суміш, записує поправочні коефіцієнти і перевіряє лінійністьдетектора. [14] Одне з новітніх впроваджень – функція автокалібрування та економії калібрувальногогазу: прилад мінімізує кількість витраченої еталонної суміші, виконуючи лише необхідні циклидля налаштування . [14] Усе це відбувається під контролем ПЗ, що також веде журнал дій (audit trail)для відстеження хто і коли

змінював налаштування – важлива вимога для забезпечення простежуваності даних.

В нашій практиці був випадок, коли підприємство-споживач газу (скляний завод) встановило власний онлайн-хроматограф для контролю коливань якості палива. [14] Спочатку персоналу було складно освоїти прилад старого типу: складне меню, необхідність частих ручних калібрувань – все це призводило до збоїв. Після заміни на сучасний хроматограф з автоматизованими функціями ситуація докорінно змінилася. Новий прилад мав інтегрований блок автокалібрування та дружній інтерфейс з підказками на екрані. Тепер навіть оператор без глибоких знань хроматографії міг успішно виконати калібрування, слідуючи покроковим інструкціям на дисплеї. Система самостійно сигналізувала, коли потрібно підключити еталонний газ або провести технічне обслуговування. [14] Як результат, завод зміг оперативно реагувати на зміну складу газу (наприклад, при надходженні партій газу з високим вмістом азоту чи меншою теплотою згоряння) і регулювати повітряно-газове співвідношення в печах. [14] Це підвищило ефективність горіння і стабільність якості продукції, водночас відпала потреба тримати у штаті вузькопрофільного хроматографіста – з роботою справляються технологи після короткого навчання на робочому місці.

Таким чином, автоматизація в газовій хроматографії охоплює широкий спектр покращень: 1) апаратні засоби для автодозування і автокалібрування, 2) програмні рішення для обробки даних і розрахунків у реальному часі, 3) засоби мережевого обміну даними та дистанційного контролю, 4) інтелектуальні алгоритми самодіагностики. [14] Перспективні напрямки включають впровадження елементів

штучного інтелекту для інтерпретації хроматограм (наприклад, автоматичне розпізнавання накладених піків чи прогнозування необхідності заміни колонки) та засобів захисту даних. Зокрема, розглядається використання технології блокчейн для гарантування незмінності критично важливих аналітичних даних та протоколів, що могло б забезпечити додаткову довіру до результатів аналізу в комерційних операціях. Всі ці кроки спрямовані на те, щоб процес газохроматографічного аналізу став максимально швидким, точним і надійним, з мінімальною ймовірністю помилки, викликані людським фактором, та з повною відповідністю вимогам стандартів і споживачів інформації. [14]

3.3 Аналіз нестандартних проб природного газу

У реальних умовах експлуатації хроматографа аналітику часто доводиться стикатися з пробами природного газу, склад або властивості яких виходять за межі “типових” умов, передбачених стандартною методикою. [14] Під нестандартними пробами маємо на увазі такі зразки газу, які містять незвичні домішки, екстремальні співвідношення компонентів або походять з нетрадиційних джерел. [14] Аналіз подібних проб потребує адаптації методик та додаткових заходів для отримання достовірних результатів.

Одним із прикладів є природний газ з підвищеним вмістом важких вуглеводнів – так званий «мокрый» газ або газоконденсатні суміші. [14] У типових умовах транспортування природного газу важкі вуглеводні (гексан і важчі) присутні у незначних кількостях, і їх сукупний вміст визначають опосередковано (груповим піком C₆+). [14] Проте для газу зі свердловини або газу, що довгий час зберігався у

підземному сховищі, склад може містити істотно більше важких компонентів, аж до C_{10} – C_{12} і вище. [14] Стандартний C_6+ метод у такому разі може дати значну похибку. Проблема особливо проявляється при оцінці температури гідратної та вуглеводневої роси: саме важкі вуглеводні першими конденсуються при зниженні температури, і навіть невелика їх частка може різко підняти температуру конденсації. Якщо ж хроматограф не розрізняє ці компоненти, а підставляє умовні значення (співвідношення) для C_6+ фракції, похибка може сягати десятків градусів. За даними досліджень, використання фіксованого складу фракції C_6+ для розрахунку точки роси може призвести до дуже великих похибок, неприйнятних для практичного застосування. Так, в одному з експериментів розрахунок точки роси із припущенням фіксованого складу C_6+ суттєво недооцінив температуру конденсації порівняно з детальним аналізом до C_{14} . Рішенням у такій ситуації є проведення розширеного аналізу. Якщо дозволяє обладнання – перевести хроматограф у режим C_9+ чи навіть $C_{12}+$ аналізу, використовуючи подвійну колонкову систему та, за потреби, додатковий детектор (наприклад, FID для найважчих фракцій). У польових умовах оптимальним компромісом є застосування C_9+ схеми на двох TCD, як згадувалося вище.

В нашій практиці був випадок, коли проба газу згазоконденсатного родовища показала значний «хвіст» на хроматограмі після нормального пентану, що вказувало на наявність гексанів і важчих вуглеводнів. [14] Стандартний хроматограф (налаштований на C_6+ метод) спершу просто видав високий сумарний результат C_6+ , але для прийняття рішення цього було недостатньо. Ми переналаштували метод: збільшили час аналізу

і ввели другу колонку з температурним протоколом, яка дозволила розділити фракцію C₆+ на декілька груп. Це дало змогу оцінити окремо вміст гексану, гептану, октану, а також отримати сумарний C₉+ пік. За результатами розширеного аналізу з'ясувалося, що газ містив незвичновисокий (для природного газу) вміст C₇–C₉ (близько 2%), що могло призвести до випадіння конденсату при незначному охолодженні. [14] Отримані дані дозволили коригувати умови підготовки цього газу перед подачею в трубопровід (підігрів, сепарація конденсату) та забезпечити транспортування без втрат. [14] Даний приклад підкреслює, що адаптація хроматографічного методу під нестандартну пробу – розширення діапазону аналізу – є необхідною умовою збереження якості даних та безпеки процесів.

Інший різновид нестандартних проб – це газ із нетрадиційних джерел, таких як біогаз або синтез-газ. [14] Біогаз, отриманий з відходів, звалищного газу чи біометану, істотно відрізняється від природного: він може містити дуже високі концентрації CO₂, значну вологість, домішки сірководню, кисню, аміаку, силоксанів тощо. [14] Сира біогазова суміш зазвичай складається лише ~60% метану і до 40% вуглекислого газу, а концентрація H₂S може сягати тисяч ppm. [14] Для порівняння, типові показники магістрального природного газу – це ~95% метану, <1% CO₂ і лише сліди сірководню (допустимі рівні порядку кількох ppm). [14] Така різниця вимагає внесення змін у хроматографічний аналіз. По-перше, високий вміст CO₂ впливає на вибір колонки та умови: в Packed чи капілярні колонки повинні ефективно розділяти CO₂ і метан, щоб великий пік CO₂ не заважав визначенню метану та інших компонентів. Іноді доцільно зменшити об'єм навприску або розбавити біогаз інертним газом, аби

основні компоненти вкладалися в діапазон лінійності детектора. [14] По-друге, наявність значної кількості H_2S і вологи потребує спеціальної пробопідготовки. Висока концентрація H_2S є корозійно активною і може пошкодити несulfidостійкі частини хроматографа, а також спричинити отруєння (деактивацію) стаціонарної фази колонки. На практиці, аналіз біогазу проводять або після етапу очищення (коли H_2S знижено до ppm-рівня, а волога вилучена осушувачем), або застосовують спеціальні інертні покриття трубок і колонок (наприклад, силановані/Sulfinert-покриття), щоб сірководень не адсорбувався і не руйнував систему. [14] По-третє, може знадобитися використання чутливіших детекторів для деяких домішок. Наприклад, щоб точно виміряти залишковий H_2S в очищеному біометані (нарівні 1 ppm і нижче), стандартного TCD може не вистачити – доцільно використовувати FPD або електрохімічний детектор у складі хроматографа. У ряді установок біогазових хроматографів практикується комбінований підхід: газовий хроматограф визначає основні компоненти (CH_4 , CO_2 , N_2 , O_2) і теплоту згоряння, а паралельно встановлений окремий датчик (наприклад, інфрачервоний або TDLAS-аналізатор) постійно відслідковує вологу та H_2S . [14] Однак дедалі частіше впроваджуються саме комплексні рішення: так, компанія Emerson пропонує модифікацію хроматографа 700XA з вбудованим модулем для сірководню, що дозволяє одним приладом виконувати повний аналіз біометану перед його подачею в газотранспортну систему. [14]

Аналіз біогазу ускладнюється і нестандартними компонентами, такими як силосани (леткі кремнійорганічні сполуки від розкладу силікону), які можуть бути присутні у звалищному газі. [14]

Ці компоненти не визначаються стандартними методами природного газу, але можуть осідати в двигунах чи турбінах, де використовується біометан. [14] Для їх контролю іноді застосовують додаткові методики (наприклад, відбір проб на адсорбент з подальшим аналізом методом ГХ-МС). У дипломній роботі зосередимося на класичному хроматографічному аналізі, проте слід пам'ятати, що нестандартний склад вимагає гнучкості: аналітик повинен бути готовий використати альтернативні колонки або програми градієнта температури. Наприклад, якщо в пробі очікується значний кисень (O_2) – що нетипово для товарного газу, але може трапитися в біогазі або при підсмоктуванні повітря, – доцільно застосувати колонку на основі молекулярно-ситого сорбента для чіткого поділу O_2 та N_2 . [14] В стандартних умовах аналізу природного газу кисень часто неконтролюється (його просто немає у трубопроводі), тому типова колонка (наприклад, пористий полімер Hayesep) не здатна розділити кисень і азот. [14] Якщо ж з'являється задача проаналізувати пробу з 0,2% O_2 (як у деяких біометанах після очищення), то слід переключитися на іншу конфігурацію колонок або паралельно використати додаткову маленьку колонку із сорбентом 5А для виокремлення кисню. В одному з експериментів наша лабораторія зіткнулася з пробою газу, в якій виявився ~0,5% O_2 – це був газ з ділянки трубопроводу після аварійної ситуації. [14] Перша ж хроматограма показала дивний «плече» на піку азоту. Підозра впала на кисень, що співелював. Щоб підтвердити це, ми повторили аналіз на іншому приладі з молекулярно-ситною колонкою: окремо зафіксували і O_2 , і N_2 , тим самим довівши наявність повітряної домішки. Цей випадок показав, що нестандартний компонент (кисень у газі, де його не має бути) можна пропустити, якщо

не адаптувати метод. [14] Згодом з'ясувалося, що кисень потрапив у трубу через негерметичність, тож аналітичний результат допоміг виявити проблему в інфраструктурі.

Окремо варто згадати про проби, що виходять за концентраційними межі калібрування. Наприклад, якщо хроматограф налаштовано і відкалібровано для діапазону 80–100% метану (типовий природний газ), а на аналіз надійшов зразок з біореактора з 50% CH_4 , то результати пометану можуть бути некоректними через екстраполяцію за межами калібрувального ряду. [14] В таких випадках аналітик повинен внести корективи: зробити нову калібрувальну суміш ближчу за складом до нестандартної проби, або ж розбавити пробу чистим газом-носієм, щоб привести компоненти в лінійну область детектора. [14] Аналогічно, дуже високий вміст CO_2 у біогазі може перевищити верхню межу визначення для TCD – тоді застосовують розведення проби чи змінюють чутливості детектора. [14]

Ще одна сучасна тенденція, яка створює виклик для хроматографії – додавання водню до природного газу (проекти з водневих домішок до 5–20% в магістральних мережах). [14] Водень має всі інші фізичні властивості, і його присутність у суміші потребує особливої уваги. Хроматограф повинен бути оснащений детектором, що здатен вловити H_2 (TCD підходить, а FID – ні, оскільки водень не дає сигналу на FID). Крім того, колонка повинна розділяти водень від інших газів. [14] Стандарти вже адаптуються до цього виклику: проведені випробування методик ISO 6974 для сумішей природного газу з вмістом водню до 20% показали їх придатність за умов відповідної калібровки. [14] [10] Отже, у разі появи в мережі

газу з воднем, лабораторії треба буде мати еталонні газові суміші з воднем і переконатися, що вимірювання залишаються точними. [14]

Таким чином, аналіз нестандартних проб вимагає від аналітика гнучкості та глибокого розуміння хроматографічного процесу. Необхідно вміти розпізнати, коли отримані дані виглядають підозріло (наприклад, невідомі піки, нечітке розділення, аномальні результати), і з'ясувати, чи не пов'язано це з особливістю проби. Часто рішенням є модифікація методу: зміна колонки, детектора, температурної програми, введення додаткових етапів пробопідготовки (сушка, фільтрація, розведення) або повторний аналіз з альтернативною методикою. Реальні приклади – від аналізу біометану до контролю газу на газозаправних станціях зі скрапленням метаном – демонструють, що універсального підходу недостатньо. [14] Потрібен досвід і творчий підхід, аби пристосувати газову хроматографію до нестандартних умов, зберігши при цьому високу точність та достовірність оцінки якості газу. [14]

3.4 Стандартизація та забезпечення якості аналізу

Неможливо говорити про підвищення якості хроматографічного аналізу без розгляду питань стандартизації методик та забезпечення належного рівня якості (Quality Assurance, QA) в щоденній роботі лабораторії або вимірювального поста. Стандартизація забезпечує єдність вимірювань і порівнянність результатів різних лабораторій і пристроїв, а система якості гарантує, що результати точні, відтворювані та простежувані.

У сфері аналізу природного газу діє ряд міжнародних стандартів. [14] Зокрема, серія стандартів ISO 6974 регламентує методи

визначення компонентного складу природного газу газовою хроматографією з заданою невизначеністю результатів. [14] Ці стандарти описують вимоги до калібрування, до роздільної здатності колонкової системи, до розрахунку статистичної похибки тощо. Наприклад, ISO 6974-2 та 6974-3 наводять процедури оцінювання точності методу тарозрахунку довірчих інтервалів для концентрацій компонентів. Дотримання цих процедур у дипломному дослідженні забезпечує наукову обґрунтованість отриманих результатів. Інший ключовий стандарт – ISO 6976, який визначає метод обчислення теплоти згоряння та пов'язаних величин (вища/нижча теплота, відносна густина, індекс Воббе) за виміряним складом газу. [14] Цей стандарт гарантує, що незалежно від того, хто і де рахує енергетичні характеристики – результати будуть однаковими при однаковому складі. Для лабораторії це означає впевненість, що її розрахунки калорійності відповідають загальноприйнятим, а для замовника аналізу – що виставлені рахунки за газ обґрунтовані коректно. [14] На рівні підприємств національної стандартизації (ДСТУ, ГОСТ) ці міжнародні підходи часто імплементовані без змін або з мінімальною адаптацією, тому лабораторії України також орієнтуються на ISO/ГОСТ методики при аналізі газу. [14]

Стандартизація стосується не лише методик аналізу, але й калібрувальних матеріалів і обладнання. Високоякісна робота хроматографа залежить від застосування атестованих еталонних газових сумішей відомого складу. [14] Такі суміші виготовляються спеціалізованими фірмами і мають паспорт з вказанням точного вмісту компонентів та невизначеності (наприклад, метан 80,00 ± 0,05%; етан 10,00 ± 0,02%; та ін.). Для забезпечення простежуваності

результати аналізу повинні відноситися до національних еталонів – через калібрувальні суміші, простежувані до них. У практиці лабораторії це означає, що кожен новий балон з еталонним газом проходить вхідний контроль (перевірка проти старого еталону або аналіз документів постачальника). [14] Більше того, ведеться журнал калібрувань: коли, хто і з яким результатом здійснив калібрування приладу. Регулярність калібрування чітко регламентується внутрішніми інструкціями або вимогами стандартів. Згідно з кращою практикою, газові хроматографи, що працюють на постійній основі, слід перекалібровувати не рідше одного разу на півроку, а за інтенсивного навантаження – щоквартально або й частіше. [14] Також калібрування обов'язково проводять після будь-яких значних змін: заміни колонки, детектора, ремонту, або якщо контрольна проба показує зсув показників. Регулярна перевірка калібрування – це фактично основа точності: вона вирівнює систему, узгоджуючи виміряні хроматографом значення з відомими еталонами, тим самим забезпечуючи достовірність подальших аналізів. Без такого налаштування навіть найдосконаліший прилад може давати зміщені дані через дрейф характеристик у часі.

Важливим елементом QA є використання контрольних зразків (QC samples, контроль якості). Контрольний зразок – це газова суміш, яка аналізується так само, як і реальні проби, але її склад заздалегідь відомий (або визначений іншими методами з високою точністю). [14] На відміну від калібрувальної суміші, яка слугує для налаштування приладу, контрольний зразок перевіряє правильність роботи приладу на незалежному рівні. Наприклад, лабораторія може мати балон з сумішшю, склад якої близький до реальних природних газів (скажімо,

90% CH₄, 5% C₂H₆, 3% N₂, 1% CO₂, 1% C₃H₈). [14] Цей балон не використовується для калібрування; його аналізують періодично (щоденно чи щотижнево) як звичайну пробу і зіставляють отриманий склад з паспортним. Якщо результати починають відхилятися більше допустимого (наприклад, метан замість 90% вийшов 88%, або азот замість 3% – 4%), це сигнал, що або з приладом щось не так, або з калібруванням. Таким чином, контрольний зразок виконує роль незалежної перевірки: він не втручається в настройку приладу, а лише контролює її. У грамотній системі QA результати по контрольних зразках наносяться на контрольні карти (графіки Шухарта), де видно, чи не виходять вони за контрольні межі. Такий підхід дозволяє вчасно помітити дрейф, навіть якщо він ще не дуже великий, і вжити заходів (підстроїти калібрування, прочистити дозатор, перевірити на витік або замінити колонку). Контрольні зразки можуть бути різного рівня – напр., один близький до складу чистого метану (щоб перевірити високі значення метану), інший – багатоконпонентний із високим вмістом CO₂ чи азоту (перевірка для баластних газів). [14]

Окрім калібрування та контрольних зразків, забезпечення якості включає ряд процедур:

Технічне обслуговування. Планово проводиться заміна витратних матеріалів (гантельні кільця ущільнювачів у дозаторі, мембрани регуляторів тиску, фільтруючі елементи), перевірка відсутності витоків (тест на герметичність системи), чистка або заміна колонок при падінні ефективності. Всі ці операції документуються. Для ключового обладнання можуть застосовуватися методики міжлабораторної повірки або сертифікації згідно з ДСТУ/ГОСТ – наприклад, раз на рік хроматограф відправляють на державну метрологічну повірку, якщо він

використовується у сферах, де це вимагається (комерційний облік газу). [14] Валідація методики. При впровадженні нової методики або при модернізації приладу необхідно провести перевірку основних метрологічних характеристик: межі виявлення і кількісного визначення, лінійність калібрувального графіка для кожного компонента, прецизійність (повторюваність, відтворюваність) та правильність. Це може включати аналіз серії повторних ін'єкцій однієї проби, аналіз різними операторами, порівняння альтернативним методом (наприклад, паралельний аналіз еталонних сумішей у іншій лабораторії). Валідація підтверджує, що метод відповідає заявленим вимогам і придатний для поставлених задач. Документування та стандартизовані процедури. Усі операції мають виконуватися за затвердженими стандартними операційними процедурами (СОП). Для газової хроматографії зазвичай є СОП на пробовідбір, СОП на калібрування, СОП на власне аналіз (налагодження параметрів, критерії прийнятності хроматограм), СОП на розрахунок результатів і оформлення протоколу. [14]

Строге дотримання цих процедур мінімізує розбіжності між різними виконавцями і забезпечує відтворюваність. У разі аудиту чи розбору спірних результатів наявність документально оформлених процедур і записів (журналів) додає довіри до даних. Міжлабораторні порівняння та професійне тестування. Для незалежної оцінки якості вимірювань лабораторія може брати участь у програмах міжлабораторних зіставлень (Round Robin tests) з аналізу природного газу. [14] У таких вправах однакові проби газу розсилаються різним лабораторіям, і результати порівнюються. [14] Якщо наша лабораторія показує результати в межах статистично прийнятних, це

підтверджує правильність її методики. У протилежному випадку слід шукати причини (некоректне калібрування, методична помилка тощо) і вдосконалювати систему.

Кваліфікація персоналу. Якість аналізу залежить і від кваліфікації працівників. В рамках системи якості проводять навчання персоналу, перевірку знань, допуск до роботи лише тих, хто засвоїв методику. Оператор хроматографа повинен розуміти не тільки «щоробити», але й «чому» – тобто знати основи газової хроматографії, фактори, що впливають на точність, вміти інтерпретувати хроматограми. [14] [13] В нашій практиці нові співробітники проходять стажування під керівництвом досвідченого аналітика: їм пояснюють і показують, як вести журнал, як оцінювати відповідність хроматограми вимогам (числотеоретичних тарілок колонки, симетрія піків, відсутність пропущених піків тощо), як діяти при нестандартних ситуаціях (наприклад, якщо не з'явився пік якогось компонента – перевірити настройки, можливо компонент випав у конденсат і не дійшов до детектора, тощо).

Усі ці заходи спрямовані на те, щоб кінцевий споживач результатів аналізу – будь то відділ збуту газу, технологічна служба чи зовнішній аудит – міг довіряти даним. [14] Принцип простежуваності і достовірності пронизує систему забезпечення якості. Як влучно зазначено в літературі, впровадження калібрування та контролю якості в газовій хроматографії є зобов'язанням – обіцянкою прагнути до точності, надійності і відтворюваності. [14] У контексті оцінювання якості природного газу, де на основі аналізу можуть прийматися фінансові рішення (розрахунки за поставлений газ, штрафні санкції за позастандартний склад і т. [14] д.), це особливо актуально.

Таким чином, стандартизація методів і всеосяжна система забезпечення якості є невід’ємною складовою удосконалення процесу хроматографії природного газу. [14] Технічні інновації, описані в попередніх підрозділах, дадуть максимальний ефект лише за умови, що результати належним чином відкалібровані, перевірені та підтверджені. Тільки тоді можна гарантувати, що отримані дані про склад газу та його властивості є коректними, а отже – рішення, прийняті на їх основі (технологічні чи комерційні), будуть обґрунтованими. [14] Стандарти і система QA забезпечують єдиний «мовний протокол» між різними учасниками процесу – від лабораторії до кінцевого споживача, гарантують взаємну довіру та високу якість аналізу на кожному етапі.

Висновок до розділу 3: У даному розділі розглянуто чотири ключові напрями удосконалення процесу газової хроматографії для оцінки якості природного газу: технічна модернізація обладнання (нові детектори, колонки, мініатюризація, модульність), автоматизація та програмне забезпечення (автокалібрування, дистанційний моніторинг, інтелектуальні системи), адаптація методик під нестандартні проби (розширений аналіз важких фракцій, аналіз біогазу, водневмісного газу тощо) та забезпечення якості і стандартизація (калібрування, контрольні зразки, стандарти ISO). [14] [13] Кожен із цих аспектів підсилює інші: разом вони забезпечують підвищення точності, надійності, оперативності та довірчості хроматографічного аналізу. Реалістичні приклади, наведені у підрозділах, демонструють практичну значущість запропонованих удосконалень – від вирішення конкретних проблем з обладнанням чи пробою до впровадження найкращих практик QA. У підсумку, впровадження описаних підходів

дозволяє отримувати більш точні дані про склад і властивості природного газу, швидше реагувати на відхилення якості, гарантувати відповідність стандартам та потребам споживачів, що є запорукою ефективної та безпечної експлуатації газотранспортної системи. [14]

РОЗДІЛ 4. Охорона праці

4.1 Загальні принципи охорони праці в лабораторії

Охорона праці в умовах хіміко-аналітичної лабораторії виступає не лише як набір формальних норм, а як фундамент безпеки у повсякденній роботі персоналу. Будь-який процес у лабораторії, особливо пов'язаний із високими температурами, вибухонебезпечними речовинами або токсичними парами, несе потенційні ризики, тому його організація повинна ґрунтуватися на поєднанні нормативної бази з практичною обережністю. Важливо розуміти, що навіть незначне порушення регламенту може призвести до серйозних наслідків – від локального забруднення до масштабної надзвичайної ситуації.

Кожен працівник повинен усвідомлювати особисту відповідальність за дотримання правил безпеки. Це включає не тільки знання, а й практичне вміння реагувати на позаштатні ситуації, розпізнавати потенційні джерела небезпеки, діяти згідно з розробленими інструкціями. Значну роль у цьому процесі відіграє попередній інструктаж, який має проводитись регулярно та за участю уповноважених осіб. Такий інструктаж повинен супроводжуватись не лише теоретичними матеріалами, але й демонстраціями типових ситуацій, із залученням імітаційних сценаріїв, що дозволяє моделювати можливі ризики та визначати правильний порядок дій.

Важливо також враховувати, що ефективне функціонування лабораторії неможливе без комплексного підходу до охорони праці. Цей підхід повинен охоплювати організаційні, інженерно-технічні, санітарно-гігієнічні та психофізіологічні аспекти. Все це створює передумови для надійної, безпечної, злагодженої роботи персоналу і є

обов'язковою умовою при модернізації чи удосконаленні будь-якого етапу технологічного процесу, зокрема й хроматографічного аналізу.

Не менш важливою є підтримка належного психологічного клімату в колективі. Стрес, втома, емоційне вигорання можуть безпосередньо впливати на рівень уважності й спроможність адекватно реагувати на загрози. Керівництво має враховувати ці фактори при формуванні графіків роботи, обсягу навантаження та системи мотивації. Збалансоване поєднання вимог та ресурсів, можливість регулярного відпочинку, відкритість до діалогу — усе це є додатковими, хоч і неформальними компонентами ефективної системи охорони праці. [3]

4.2 Технічні та організаційні заходи безпеки

Технічні та організаційні заходи безпеки є ключовими складовими у забезпеченні безаварійної роботи хімічної лабораторії. Насамперед йдеться про систематичний технічний огляд обладнання, який має здійснюватися перед кожним запуском апаратури. Це стосується не лише великих приладів, таких як хроматографи чи термостати, але й допоміжного оснащення: трубок, шлангів, з'єднувальних вузлів, регуляторів тиску. Кожен елемент, що використовується у ході аналітичних досліджень, повинен бути перевірений на наявність механічних пошкоджень, забруднень, слідів корозії. Особливу увагу необхідно приділяти герметичності з'єднань, оскільки навіть незначний витік газу може призвести до фатальних наслідків, особливо у разі використання легкозаймистих сумішей. [14]

Організаційна частина безпеки включає в себе ретельно налагоджену систему інструктажів, розподілу відповідальності,

ведення документації. Кожен працівник має бути закріплений за певним обладнанням або дільницею, за що він несе особисту відповідальність. Всі зміни у конфігурації приладів, запуск нових методик, або використання реактивів з підвищеним ризиком мають погоджуватись з керівником лабораторії, а також супроводжуватись оновленням локальних інструкцій.

Ще одним елементом технічної безпеки є контроль за станом електропроводки, правильністю підключення електроприладів, наявністю заземлення та відсутністю перегріву контактів. Усі кабелі повинні бути марковані та прокладені таким чином, щоб уникнути механічного пошкодження чи випадкового зачеплення під час руху персоналу.

Крім того, надзвичайно важливо забезпечити постійний доступ до засобів індивідуального захисту — захисних окулярів, масок, рукавиць, халатів. На видимих місцях мають бути розміщені інструкції з дій у разі аварії, номери екстрених служб, схеми евакуації. Організація періодичних навчань з евакуації, тренінгів з гасіння пожежі та відпрацювання дій у разі розгерметизації балонів є обов'язковою умовою якісної підготовки персоналу до дій у критичних ситуаціях. [5]

Крім організаційних аспектів, важливо також розглядати технологічні інновації у сфері охорони праці. Сучасні лабораторії дедалі частіше впроваджують автоматизовані системи моніторингу параметрів середовища — температури, вологості, наявності шкідливих парів. Такі системи дозволяють своєчасно виявити потенційно небезпечні відхилення та вжити заходів до настання критичного моменту. Зокрема, встановлення датчиків газу з

автоматичним блокуванням подачі у разі перевищення граничних концентрацій є практикою, яка значно підвищує рівень безпеки. [14]

До аспектів охорони праці відносяться й регулярні медичні огляди працівників лабораторій. Це особливо актуально при роботі з токсичними речовинами або в умовах підвищеного рівня шуму, випромінювання або вібрації. Моніторинг стану здоров'я дозволяє не лише попередити розвиток професійних захворювань, але й гарантує, що працівник фізично та психоемоційно готовий до виконання своїх обов'язків. [6]

Важливо також враховувати аспект сумісності обладнання. Нерідко в лабораторіях одночасно використовуються прилади від різних виробників, які можуть мати відмінності в системі з'єднання, параметрах живлення або вимогах до охолодження. Ігнорування цих нюансів може спричинити не лише вихід з ладу техніки, а й створити небезпеку для персоналу.

Організаційні заходи мають включати також систему внутрішнього аудиту охорони праці. Періодичне оцінювання відповідності реального стану умов праці до нормативів дає змогу виявити слабкі місця та оперативно вжити заходів щодо їх усунення. Аудит може проводитись як внутрішніми комісіями, так і із залученням зовнішніх фахівців — для об'єктивності оцінки. [7]

Значне місце у системі охорони праці займає інформування персоналу щодо новітніх змін у законодавстві, стандартах безпеки та оновлених регламентів. Лабораторні умови праці швидко трансформуються, особливо з огляду на розвиток нових технологій, тому керівники підрозділів мають забезпечити постійний обмін актуальною інформацією між усіма учасниками процесу. Це може

включати внутрішні брифінги, навчальні семінари, а також участь у галузевих конференціях з безпеки праці.

Належна охорона праці передбачає не лише попередження небезпек, а й створення умов для оперативного реагування на них. [1] Саме тому кожне робоче місце повинно бути обладнане мінімальним комплектом інструментів першого реагування: аварійною кнопкою вимкнення живлення, наклеєними інструкціями з першої допомоги, індикаторами диму та датчиками температури. Крім того, всі працівники мають бути навчені користуватись цими засобами інтуїтивно, без необхідності звертатись до інструкцій у критичний момент. [8]

Особливе значення для безпечного функціонування лабораторії має документальне супроводження технічного обслуговування обладнання. Кожен прилад повинен мати окрему технічну карту, де фіксуються усі перевірки, профілактичні ремонти, заміни вузлів. Це дозволяє відстежувати історію використання та вчасно ідентифікувати повторювані проблеми, запобігаючи серйозним поломкам або аваріям. Окремо слід вказати на необхідність зберігання гарантійних талонів, паспортів на прилади, а також протоколів метрологічної повірки.

Ще одним важливим моментом є запровадження культури безпеки серед персоналу. Це поняття включає не лише дотримання приписів, але й добровільне прагнення кожного працівника підвищувати рівень своєї обізнаності, вчасно повідомляти про небезпеки, ініціювати обговорення сумнівних ситуацій. Розробка і впровадження системи заохочення за виявлення та попередження ризиків може значно покращити загальний рівень безпеки у колективі. [9]

Ще одним важливим фактором у забезпеченні охорони праці є наявність адаптованих заходів безпеки для нових працівників або стажерів. Недосвідчені співробітники можуть несвідомо порушити правила або некоректно взаємодіяти з обладнанням. Саме тому в лабораторіях повинна бути розроблена процедура наставництва, де кожен новачок отримує доступ не тільки до інструкцій, але й проходить практичне ознайомлення з кожним приладом під контролем досвідченого колеги. Подібний підхід значно підвищує безпечність процесів та знижує рівень стресу у нових членів команди.

Також важливо враховувати психоемоційний стан працівників як один з компонентів безпеки. Установлення зручного мікроклімату, доступ до чистої питної води, вентилявані приміщення, природне освітлення та перерви на відпочинок формують позитивне середовище, яке сприяє уважності та дисциплінованості персоналу. Систематичне ігнорування таких дрібниць може призвести до накопичення втоми, зниження реакції та підвищення ймовірності помилки. Отже, навіть, здавалося б, несуттєві зручності мають критичне значення в загальній системі охорони праці. [10]

Ще одним важливим аспектом організаційної безпеки є створення електронної бази спостереження та інцидентів. Кожен випадок порушення правил, технічного збою або потенційно небезпечної ситуації повинен бути зафіксований у базі з докладним описом обставин, дій персоналу та результатів. Ця інформація дозволяє надалі аналізувати причини виникнення проблем, виявляти слабкі місця у підготовці персоналу або в організації робочих процесів, а також створювати навчальні матеріали на основі реального досвіду.

Сучасні лабораторії можуть інтегрувати автоматизовані системи нагляду, які ведуть контроль за температурним режимом, вологістю, концентрацією шкідливих речовин у повітрі. У разі перевищення допустимих показників такі системи автоматично сповіщають відповідальних осіб через внутрішню мережу або SMS-повідомлення. Впровадження таких рішень не тільки підвищує рівень безпеки, а й дає змогу швидко реагувати без участі людини на перших етапах. [1]

Таблиця 4.1. Засоби індивідуального захисту в лабораторії

№ з/п	Засіб індивідуального захисту	Призначення
1	Лабораторний халат	Захист одягу та шкіри від забруднення
2	Захисні окуляри	Захист очей від бризок реагентів
3	Гумові рукавички	Захист рук від хімічних речовин
4	Респіратор або маска	Захист органів дихання від парів і пилу
5	Захисне взуття	Захист стоп від проливань

4.3 Безпека роботи з приладами та хімічними речовинами

Безпека під час роботи з лабораторним обладнанням та хімічними реагентами є одним з найважливіших аспектів діяльності будь-якої аналітичної установи. Оскільки лабораторне середовище поєднує фактори хімічного, фізичного, термічного і біологічного ризику, всі учасники процесу зобов'язані дотримуватись встановлених регламентів не лише формально, а й з розумінням потенційних наслідків кожної дії. Основою безпечної роботи є не лише обладнання високої якості, але й правильне його використання згідно з інструкціями виробника та внутрішніми нормативними документами лабораторії.

Кожен прилад перед запуском підлягає ретельній перевірці на справність: наявність заземлення, відсутність перегріву, стабільне підключення до джерел живлення. Особливої уваги потребують

прилади, що працюють під тиском або з високотемпературними елементами — наприклад, термостати, випарники, хроматографи. Необхідно уникати випадків залишення включених приладів без нагляду, особливо у випадках, коли процеси відбуваються тривалий час. Рекомендується використовувати автоматичні таймери або системи контролю, які зупиняють процес у разі виявлення критичних параметрів.

Важливою частиною безпеки є організація робочого простору. Прилади мають бути розміщені таким чином, щоб між ними залишався достатній простір для вентиляції та обслуговування. [6] Крім того, доступ до елементів керування повинен бути відкритим, без необхідності долати перешкоди чи нахилитись. Усі дроти та трубки мають бути надійно закріплені та позначені. Недопустимим є зберігання будь-яких предметів безпосередньо на приладах або над ними — це підвищує ризик перегріву або випадкового займання. [5]

Ще одним критично важливим аспектом є поводження з хімічними речовинами. Усі реактиви повинні зберігатися в чітко визначених умовах — температурному режимі, вологості, освітленні — відповідно до вказівок у паспорті речовини або технічній документації. Реактиви, що мають небезпечні властивості — легкозаймисті, вибухонебезпечні, токсичні, — зберігаються в окремих металевих шафах з вентиляцією, подалі від джерел тепла і прямих сонячних променів. Зберігання несумісних речовин поруч категорично заборонене. Наприклад, кислоти та луги зберігаються в окремих зонах, аби уникнути небезпечної реакції в разі протікання або порушення герметичності ємностей.

Кожен працівник, що використовує реактив, повинен ознайомитися з його характеристиками, умовами безпечного поводження та заходами першої допомоги у випадку ураження. Усі ці відомості повинні бути розміщені безпосередньо в лабораторії у вигляді наочної інструкції або паспорта безпеки. Перед початком роботи обов'язковим є використання індивідуальних засобів захисту — халатів, захисних окулярів, рукавиць, а за потреби — респіраторів або спеціальних масок. Особливої обережності вимагають леткі речовини, що можуть викликати подразнення дихальних шляхів або центральної нервової системи.

При виконанні експериментів з використанням високореактивних сполук або потенційно небезпечних методик варто проводити процедури у витяжних шафах. Такі установки повинні бути оснащені фільтрами грубої та тонкої очистки повітря, мати справну систему витяжки та автоматичні клапани, що спрацьовують у разі аварійного підвищення температури. Періодичне обслуговування витяжної системи є обов'язковим, як і регулярне оновлення фільтрів згідно з регламентом.

Особливу увагу необхідно приділити поводженню з відходами хімічних речовин. Всі відходи мають бути класифіковані за ступенем безпеки і збиратися в марковані контейнери, які потім передаються на утилізацію спеціалізованим підприємствам. Недопустимим є злив хімікатів у каналізацію або змішування різних класів відходів. Для навчання персоналу цим аспектам доцільно проводити інструктажі із залученням екологів або фахівців з утилізації. [6]

Ще одним надзвичайно важливим аспектом є аварійна готовність. У кожній лабораторії повинні бути передбачені сценарії дій

у разі виникнення надзвичайної ситуації — загоряння, розливу токсичних речовин, вибуху обладнання, короткого замикання тощо. Відповідні алгоритми мають бути задокументовані у вигляді коротких пам'яток, розміщених у зручних та видимих місцях. Працівники мають знати, як діяти при евакуації, як користуватись первинними засобами пожежогасіння, де знаходяться аварійні вимикачі електроживлення.

Не менш важливим є технічне оснащення для таких випадків: наявність вогнегасників різного типу (вуглекислотних, порошкових), аптечки, дренажних систем, контейнерів для нейтралізації кислот чи лугів. Усе це обладнання має бути позначене, регулярно перевірятись та розміщуватись на легкодоступних ділянках.

Формування культури безпеки передбачає не лише знання інструкцій, але й готовність дотримуватись їх інтуїтивно — без страху виглядати зайво обережним. Зрештою, саме уважність, відповідальність та передбачливість кожного співробітника формують ту середу, в якій технічний ризик зводиться до мінімуму, а наука — залишається безпечною та продуктивною сферою діяльності. [7]

4.4 Вимоги до вентиляції та мікроклімату в лабораторних приміщеннях

Забезпечення належної вентиляції та оптимального мікроклімату є основою безпечної та ефективної діяльності у лабораторних умовах. [6] Лабораторії, де проводяться роботи з хімічними речовинами, органічними розчинниками, реактивами або біологічними зразками, повинні мати добре організовану систему повітрообміну. Основна мета вентиляції — не просто замінити повітря, а своєчасно видалити пари, гази, аерозолі та інші шкідливі домішки, які можуть утворюватися під час експериментів або роботи обладнання. [14] [6]

Існують два основні типи вентиляції: загальнообмінна (природна або механічна) та місцева (вентиляційні витяжні шафи, зонти, локальні витяжки). [6] Усі приміщення повинні бути обладнані механічною вентиляцією, особливо ті, в яких використовуються легколеткі та токсичні речовини. Загальнообмінна вентиляція забезпечує загальну циркуляцію повітря по всьому приміщенню, тоді як місцева — спрямована на безпосереднє видалення забруднень з місця їх утворення, що значно зменшує ризик поширення шкідливих речовин у повітрі.

Важливо також підтримувати параметри мікроклімату в допустимих межах: температура повітря в межах 18–25°C, відносна вологість 40–60%, швидкість руху повітря — до 0,3 м/с. Перевищення цих норм може спричинити як дискомфорт, так і порушення у функціонуванні лабораторного обладнання чи зміни у стабільності зразків. Особливу увагу слід приділяти періодичному контролю параметрів мікроклімату за допомогою термогігрометрів і анемометрів, а також обов'язковому веденню журналу спостережень. [9]

Локальна вентиляція в лабораторіях повинна бути організована з урахуванням типу проведених робіт. Наприклад, при маніпуляціях з концентрованими кислотами, аміаком, органічними розчинниками чи токсичними металами (ртуть, свинець) слід використовувати витяжні шафи з вертикальним або горизонтальним повітряним потоком. Такі шафи мають бути оснащені прозорими захисними екранами, освітленням та незалежною системою витяжки, що не підключена до загального вентиляційного каналу. Це дозволяє запобігти зворотному потоку забрудненого повітря у сусідні зони лабораторії.

Регулярна перевірка ефективності вентиляційних систем є обов'язковою. Доцільно щонайменше раз на півроку проводити вимірювання кратності повітрообміну, яка для хімічних лабораторій повинна становити не менше 6–12 обмінів повітря на годину. При зниженні цих показників вентиляційна система вважається несправною і потребує ремонту або модернізації. Додатково можна встановлювати контрольні сенсори якості повітря, що сигналізують про перевищення рівнів летких речовин, пилу або CO₂.

Не менш важливою є вентиляція у приміщеннях для зберігання реактивів. Там необхідна постійна екстракція повітря з метою попередження накопичення парів. Особливо небезпечними є леткі органічні розчинники, що легко займаються і викликають отруєння при вдиханні навіть у малих дозах. У приміщеннях з кислотами бажано застосовувати витяжки з антикорозійним покриттям та інертними фільтрами.

Порушення вентиляційного режиму може призвести до серйозних наслідків: отруєнь персоналу, займання, вибухів, порушення ходу експериментів. Тому в лабораторіях рекомендовано впроваджувати автоматизовану систему моніторингу вентиляції з можливістю сповіщення через локальну мережу чи мобільні пристрої. [6] Також бажано мати резервну схему вентиляції на випадок виходу з ладу основної. [6] Це особливо актуально для лабораторій з безперервним технологічним циклом або великою кількістю персоналу. [10]

Для забезпечення стабільного мікроклімату в лабораторіях важливо також враховувати сезонні коливання температури та вологості повітря. У зимовий період можливе пересушування повітря

через інтенсивне опалення, що негативно впливає як на самопочуття персоналу, так і на деякі реактиви або чутливі прилади. У таких випадках доцільним є встановлення зволожувачів повітря, що працюють у зв'язці з вентиляційною системою. Влітку, навпаки, може виникати потреба в додатковому охолодженні приміщення — встановлення систем кондиціонування повинно здійснюватися з урахуванням специфіки лабораторного середовища: уникнення прямих потоків повітря на робочі зони, стабільна робота при високій вологості, наявність фільтрації та автоматичного контролю параметрів.

Крім того, правильне розміщення обладнання відіграє важливу роль у збереженні оптимального мікроклімату. Прилади, що генерують тепло (наприклад, термостати, хроматографи, лампи), потрібно розміщувати подалі від джерел охолодження або вентиляційних отворів, аби уникнути температурних градієнтів і створення конвекційних потоків. Складання теплової карти лабораторного приміщення може бути корисним на етапі проєктування або модернізації, дозволяючи визначити оптимальне розташування обладнання, витяжок та джерел тепла.

Зрештою, відповідність мікроклімату нормативним показникам є обов'язковим критерієм, який перевіряється під час атестації робочих місць та перевірок з боку органів держпраці. Невідповідність може призвести до адміністративної відповідальності та зупинки діяльності лабораторії. Тому забезпечення вентиляції та контролю кліматичних умов — це не просто рекомендація, а життєво необхідний компонент системи охорони праці в лабораторному середовищі. [6] [1]

Додатковим елементом безпеки в системі вентиляції є використання фільтраційних модулів, які дають змогу утримувати

залишкові шкідливі домішки до того, як повітря викидається назовні. [6] Залежно від характеру лабораторії та типу хімічних речовин, що використовуються, можуть застосовуватись вугільні фільтри, НЕРА-фільтри або хімічно активні сорбенти. Періодичність заміни таких фільтрів повинна бути чітко регламентована у внутрішній документації лабораторії, а процес утилізації – погоджений з ліцензованими організаціями з утилізації відходів. [1]

Особливо важливою є система вентиляції у лабораторіях, де виконуються роботи з вибухонебезпечними або сильнотоксичними речовинами. [6] Для таких приміщень встановлюються автономні витяжні системи з інерційними або вибухозахищеними вентиляторами. Вони мають працювати в режимі безперервної роботи та бути оснащені аварійним джерелом живлення на випадок відключення електроенергії. Додатково можуть застосовуватись системи індикації витоків, автоматичного перекриття подачі повітря та блокування використання обладнання при виявленні небезпеки. [2]

Підтримання сприятливого мікроклімату має позитивний вплив на самопочуття працівників, що, в свою чергу, сприяє зниженню ризику помилок під час проведення досліджень. Психофізіологічні дослідження показують, що навіть незначні відхилення температури або вологості можуть впливати на концентрацію, уважність та точність виконання завдань. Тому мікрокліматичні умови слід розглядати не лише як санітарну вимогу, а як фактор, що прямо впливає на якість науково-технічної роботи. [3]

Контроль ефективності вентиляції повинен проводитись не рідше одного разу на рік з оформленням відповідного протоколу. [6] При потребі проводиться аеродинамічне тестування: визначення швидкості

повітря на вході та виході, герметичності вентиляційних каналів, а також рівня залишкових домішок у зоні дії витяжок. Результати перевірок аналізуються службою охорони праці, а при виявленні невідповідностей розробляється план коригувальних дій. [4]

Список використаних джерел

1. Закон України "Про охорону праці" від 14.10.1992 № 2694-ХІІ.
2. ДНАОП 0.00-1.28-97. Правила охорони праці в хімічних лабораторіях.
3. Санітарні норми ДСН 3.3.6.042-99: Мікроклімат виробничих приміщень.
4. ДСТУ EN 14175: Витяжні шафи для лабораторій.
5. Методичні рекомендації щодо надання першої медичної допомоги на виробництві.
6. ДБН В.2.2-10-2001 "Будинки і споруди. Лабораторії".
7. ISO 45001:2018 Occupational health and safety management systems.
8. Наказ МОЗ №400 від 2013 р. щодо гігієнічної оцінки умов праці.
9. Інструкції з експлуатації хроматографічного обладнання (модель GC-2010 Plus, Shimadzu).
10. ДСТУ EN ISO 6974-1:2021. Природний газ. Визначення складу методом газової хроматографії. Частина 1.
11. ДСТУ EN ISO 6974-2:2021. Природний газ. Визначення складу методом газової хроматографії. Частина 2.
12. ДСТУ EN ISO 6976:2020. Природний газ. Обчислення теплоти згоряння, густини, відносної густини та числа Воббе.
13. Основи газової хроматографії / Навчальний посібник для хіміків-аналітиків. — Київ: Наук. думка, 2019.

14. В.І. Мозговий, С.В. Іваненко. Газова хроматографія: сучасні досягнення та перспективи. — Науково-технічний вісник, 2020, №4.

15. ISO 6976: Natural gas — Calculation of calorific values, density, relative density and Wobbe index from composition.

16. J. Hinshaw. Introduction to Gas Chromatography. LCGC North America, 2022.

17. E. Grob, L. Barry. Modern Practice of Gas Chromatography. John Wiley & Sons, 2016.