

нез'ясованою залишається лише ступінь впливу критеріїв окремо:  $\beta$ ,  $Fr_c$  і  $Re_c$ .

Визначити вплив кожного з них буде досить просто, якщо в процесі дослідження виявиться, наприклад, що критерій  $Re_c$  не впливає на шукану величину. Для цього буде досить, якщо зміна хоча б одного з параметрів  $\rho$  чи  $\mu$  у кілька разів не впливатиме на досліджуваний параметр ( $\varphi$  чи  $\lambda_c$ ), тому що при зміні  $\rho$  чи  $\mu$ , змінюється значення критерію  $Re_c$ .

У цьому випадку можна відібрати і співставити між собою визначену кількість дослідів, у яких були б закріплені усі визначальні критерії, крім  $Re_c$ , і в такий спосіб з'ясувати вплив критерію  $Re_c$ .

Аналогічно можна довести відсутність впливу критерію  $Re_c$  на шукані величини ( $\varphi$  чи  $\lambda_c$ ) у випадку автотельності останніх щодо якого-небудь з наступних трьох критеріїв:  $Fr_c$ ,  $\varphi$ ,  $\rho$ .

Якщо в процесі експериментальних досліджень жодна з перерахованих вище умов виконаною не буде, то для вивчення впливу кожного з критеріїв  $Fr_c$ ,  $Re_c$ ,  $\beta$  окремо на істинний газоміст і коефіцієнт опору буде потрібно додаткове проведення дослідів на трубах різних діаметрів.

Зазначений поділ усіх визначальних критеріїв на подібні групи не є випадковим. По-перше, виходячи з фізичної суті руху двофазних потоків у трубах варто очікувати, що основними визначальними критеріями є  $\beta$ ,  $Fr_c$ ,  $Re_c$ . Тому представлення їх в одній групі дозволяє легко визначити вплив

інших чотирьох:  $We$ ,  $\rho$ ,  $\mu$ ,  $\cos(g, z)$ .

По-друге, експериментальні дослідження дають підставу думати, що критерії  $\rho$ ,  $\mu$  і частково  $We$  не роблять істотного впливу на істинний газоміст і коефіцієнт гідравлічного опору.

Звичайно, викладена концепція не є єдиною. Подальші результати експериментальних досліджень оброблятимуться за цією методикою. Але, природно, можна застосовувати різні модифікації загального критеріального способу, проводячи відповідні обґрунтування для кожного конкретного випадку.

1. Дейч М. Е., Фролов Г. А. Гидродинамика двухфазных сред. М.: Энергия. 1968. 423с.
2. Исследование турбулентных течений двухфазных сред / В. Е. Накоряков, А. П. Бурдуков., Б. Г. Покусаев и др. Новосибирск, 1973.
3. Механика многофазных сред / А. Н. Крайко, Р. И. Нигматулин, В. Е. Старков, Л. Е. Стернин // Итоги науки и техники. Сер. гидромеханика.
4. Нигматулин Р. И. Динамика многофазных сред. М.: Наука, 1987.
5. Теплопередача в двухфазном потоке / Под ред. Д. Баттерворса и Г. Хьюитта. М.: Энергия, 1980.
6. Фисенко В. В. Критические двухфазные потоки. М.: Атомиздат, 1978.

УДК 389.14:543.544

## МЕТРОЛОГІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ХРОМАТОГРАФА КОНТРОЛЮ СКЛАДУ ПРИРОДНОГО ГАЗУ

© Теплюх З.М., Ділай І.В., 2001

Національний університет "Львівська політехніка"

**Показано важливість і необхідність контролю якості природного газу, а також доцільність застосування хроматографічного методу аналізу складу для визначення теплотворної здатності та інших параметрів споживаного природного газу. Запропоновано схему газодинамічного синтезатора взірцевих газових сумішей, який можна застосовувати для метрологічної атестації хроматографа природного газу.**

Тривале використання дешевих паливно-енергетичних ресурсів призвело до надмірного енергоспоживання в промисловості та побуті, що в значній мірі спричинило теперішній стан економіки держави в цілому. Одним із основних енергоносіїв в Україні є природний газ, причому більша частина його імпортується з Росії і Туркменистану. На сьогодні ціна природного газу для українських

споживачів є досить високою, тому це мало би спонукати їх до економного і раціонального використання "блакитного палива". Значної економії природного газу в Україні можна досягнути завдяки налагодженню його належного та постійного обліку.

Протягом десятиліть природний газ в колишньому СРСР практично не обліковувався. Однак тепер, в умовах складної ситуації в паливно-

енергетичному комплексі України, постала гостра необхідність контролю за споживаним газом, зокрема, за його енергетичною вартістю. Це пояснюється тим, що досі споживач природного газу змушений платити тільки за сумарний об'єм використаного газу, але далеко не завжди за його реальну енергетичну вартість, оскільки дотепер відсутній організований контроль енергетичної вартості природного газу.

Зрозуміло, що енергетична вартість природного газу прямо залежить від його складу, зокрема, на неї суттєво впливає вміст негорючих компонентів. Так, наприклад, збільшення частки азоту в природному газі практично настільки ж призводить до зменшення його енергетичної вартості. Склад природного газу, який постачають споживачу, залежить від багатьох факторів, головними з яких є родовище, з якого поступає газ та умови його транспортування. Так, наприклад, нижча теплота згоряння природного газу Талалаєвського родовища ( $\text{CH}_4$  - 73,35;  $\text{C}_2\text{H}_6$  - 20;  $\text{C}_3\text{H}_8$  - 4,05;  $\text{C}_4\text{H}_{10}$  - 0,97;  $\text{C}_5\text{H}_{12}$  - 0;  $\text{N}_2$  - 0,18;  $\text{CO}_2$  - 1,4 %) складає 41,089 МДж/м<sup>3</sup> а Сагайдацького ( $\text{CH}_4$  - 92,295;  $\text{C}_2\text{H}_6$  - 0,025;  $\text{C}_3\text{H}_8$  - 0,025;  $\text{C}_4\text{H}_{10}$  - 0,005;  $\text{C}_5\text{H}_{12}$  - 0;  $\text{N}_2$  - 6,95;  $\text{CO}_2$  - 0,7 %) лише 30,878 МДж/м<sup>3</sup> [1, 2]. Для споживача енергоносія із другого родовища це практично означає значну переплату у випадку, коли оплата за природний газ проводиться лише за його спожитою кількістю. Окрім того, склад природного газу може змінюватися в процесі його транспортування внаслідок різних змін його фізико-хімічних параметрів.

Із сказаного вище випливає, що постачальнику може бути вигідно подавати задану кількість природного газу гіршої якості, оскільки споживачу у цьому випадку для отримання необхідної енергії доведеться спалювати більшу кількість природного газу. Споживач в свою чергу мав би бути зацікавлений у контролі складу отриманого газу з метою зменшення власних затрат за енергоносієм. Тому важливим завданням окрім обліку кількості природного газу є і контроль його якості.

Відомо декілька методів визначення якості (теплотворної здатності) природного газу, а саме:

- за кількістю повітря, необхідного для повного спалювання природного газу [3, 4];
- калориметричною бомбою [5];
- водяним калориметром [6];
- диференціальним калориметром [7];
- сухим або вологим калориметром [8];
- за його компонентним складом [9].

В Україні на сьогоднішній день енергетичну вартість природного газу доцільно визначати за його

компонентним складом. Для цього використовують хроматографічний метод визначення складу як найбільш перспективний, оскільки хроматограф дозволяє визначати не лише компонентний склад природного газу, але й за результатами проведеного аналізу розраховувати такі його параметри, як: теплоту згоряння, густину газу, в'язкість і коефіцієнт стискуваності, необхідні, зокрема, для визначення витрати природного газу.

Хроматограф є складною аналітичною системою, яка може вважатися вимірювальним приладом лише за наявності відповідного метрологічного забезпечення [10]. Для його градування можна використовувати природний газ із різних родовищ, який потрібно атестувати за складом зразковою унікальною апаратурою, що є складним і проблематичним. Також можна готувати синтетичний природний газ за допомогою змішувальних пристроїв, що, на нашу думку, є більш перспективним.

Отже, виникає необхідність створення синтезатора газових сумішей, склад яких би був близький до складу аналізованого природного газу і при тому були точно відомі концентрації окремих компонентів в синтезованих сумішах. При наявності такого змішувального приладу можна готувати зразкові газові суміші, що дозволило би підвищити точність визначення складу природного газу за допомогою хроматографа.

Згідно з вимогами стандарту [11] в залежності від характеру вихідного сигналу аналітичного приладу його градування проводять відповідно в трьох точках діапазону вимірюваної величини (0±3, 50±3, 100-15% - для лінійної шкали), або в чотирьох (0±3, 35±3, 70±3, 100-15% - для нелінійної шкали). Отже для забезпечення градування газоаналітичних приладів в загальному випадку змішувач повинен забезпечити синтез п'яти газових сумішей. Це означає, що синтезатор для градування хроматографа повинен забезпечити можливість градування по кожному з тринадцяти компонентів в п'яти точках діапазону вимірювання, тобто забезпечувати приготування шістдесяти п'яти різних газових сумішей з концентраціями компонентів, близькими до вказаних у табл. 1.

Оскільки при цьому є можливим за допомогою однієї суміші перевірити кілька точок для різних компонентів, то загальна кількість необхідних сумішей синтетичного природного газу може бути значно меншою. Проте, у випадку необхідності дослідження взаємного впливу концентрацій компонентів, загальна кількість синтезованих сумішей може суттєво зрости.

Таблиця 1 – Номінальні значення концентрацій окремих компонентів природного газу в сумішах, призначених для градування хроматографа типу "Кристалл 2000М".

№ п/п	Компонент	Нижча теплота згоряння, МДж/м <sup>3</sup>	Концентрація компонентів у суміші, %об.				
			82,5	88,4745	91,035	94,449	99,57
1	метан	33,41	82,5	88,4745	91,035	94,449	99,57
2	етан	59,85	0,15	2,0225	2,825	3,895	5,50
3	пропан	86,53	0,05	1,0825	1,525	2,115	3,00
4	н-бутан	114,27	0,01	0,1815	0,255	0,353	0,50
5	і-бутан	113,81	0,01	0,1115	0,155	0,213	0,30
6	н-пентан	135,39	0,001	0,0356	0,0505	0,0703	0,10
7	і-пентан	135,79	0,001	0,1057	0,1505	0,2103	0,30
8	нео-пентан	136,09	0,001	0,0356	0,0505	0,0703	0,10
9	гексан	161,36	0,001	0,0356	0,0505	0,0703	0,10
10	H <sub>2</sub>	10,05	0,001	0,0356	0,0505	0,0703	0,10
11	N <sub>2</sub>	–	0,20	1,530	2,10	2,860	4,00
12	O <sub>2</sub>	–	0,001	0,3507	0,5005	0,7003	1,00
13	CO <sub>2</sub>	–	0,005	0,8783	1,2525	1,7515	2,50

Крім вказаних значень концентрацій компонентів при розробці синтезатора перевірювальної газової суміші необхідно забезпечити витрату продукуюваної ним газової суміші на рівні кількох л/год., оскільки саме з такою витратою суміш подають в хроматограф для продування крана дозатора. На виході синтезатора потрібно передбачити встановлення надлишкового тиску не менше 5 кПа, необхідного для здійснення продування хроматографа.

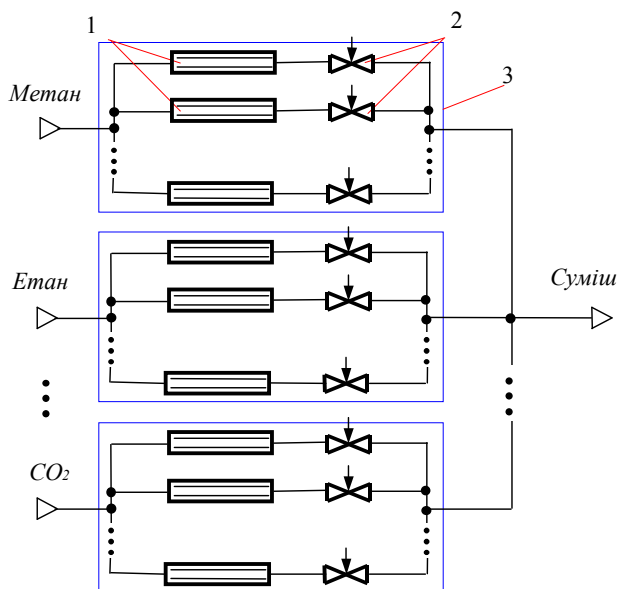
Серед синтезаторів найбільш перспективними є газодинамічні змішувачі, побудовані на базі дросельного динамічного методу змішування газових потоків з використанням капілярних елементів (КЕ) [12]. Принципова схема і конструкція таких синтезаторів можуть суттєво різнитися в залежності від заданих значень концентрацій компонентів, їх продуктивності, кількості синтезованих сумішей, можливих змін параметрів зовнішнього середовища тощо. Основні принципи побудови газодинамічних синтезаторів є такі. Газова схема синтезатора має бути побудована на базі схем суматорів потоків, а також подільників витрат і тисків [13, 14]. Висока точність приготування суміші повинна забезпечуватися за рахунок компенсації або стабілізації основних факторів впливу - тисків на виходах джерел чистих компонентів, барометричного тиску, навантаження синтезатора, температур компонентів і температури навколишнього середовища. Компенсувати вплив зміни температури і тисків можна відповідним підбором геометричних розмірів КЕ, зокрема,

підбором таких геометричних розмірів, що забезпечують лінійність його витратної характеристики [15, 16]. При цьому стабілізація деяких параметрів (тиски, температура) і створення однакових умов роботи КЕ є необхідними для забезпечення компенсації. Важливим принципом побудови синтезаторів також є застосування в каналах чистих компонентів подільників потоків, що дозволяє міняти склад газової суміші (з певною дискретністю) на виході синтезатора. Крім цього, з метою досягнення особливо високої точності приготування газових сумішей доцільно використовувати КЕ з рівними газодинамічними опорами (ГДО) як на одному, так і на різних газах [17, 18].

Один із найпростіших варіантів принципової схеми приготування газових сумішей для градування хроматографів на базі одностадійного розчинення чистих компонентів показаний на схемі рис. 1. В даному випадку відбувається змішування чистих компонентів у певному співвідношенні залежно від кількості ввімкнених КЕ в каналах кожного компоненту. В каналах чистих компонентів встановлені дросельні елементи 1, які мають рівні ГДО не лише з КЕ даного каналу чистого компонента, а також і з КЕ решти каналів. На виході кожного з них знаходяться клапани 2, які дозволяють дискретно змінювати витрату кожного компонента, а відповідно і його концентрацію в синтезованій суміші. Концентрацію компонента в синтезованій газовій суміші легко розрахувати за співвідношенням кількості КЕ, ввімкнених в даному

каналі, до сумарної кількості КЕ, які є ввімкнені в усіх каналах змішувача.

Сукупність паралельно з'єднаних між собою КЕ в каналі чистого компонента утворюють пакет дросельних елементів. Якщо на виходах КЕ пакета встановлені клапани, то такі пакети представляють собою змінні пакети дроселів 3.



1 – капілярні елементи; 2 – клапани; 3 – змінний пакет дросельних елементів

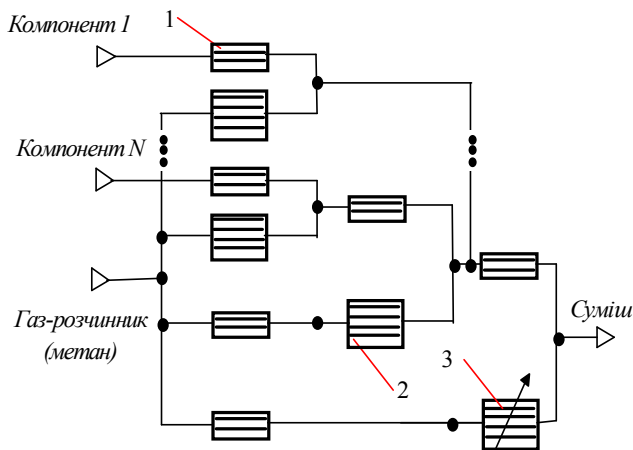
Рис.1. Варіант схеми приготування синтетичного природного газу для градування хроматографа.

При побудові газодинамічного синтезатора на базі принципової схеми, поданої на рис.1, необхідно використовувати в каналах компонентів природного газу від декількох КЕ до багатьох тисяч дроселів в каналі газу-розчинника (метану). У зв'язку з тим, реалізувати дану схему синтезатора недоцільно.

Суттєво зменшити кількість КЕ в каналах компонентів синтезованої суміші можна за допомогою багатостадійного розчинення чистих компонентів метаном (газом-розчинником). На рис. 2 показана схема багатостадійного (чотири-стадійного) розчинення метаном усіх решти чистих компонентів природного газу.

Застосування багатостадійного розчинення компонентів дозволяє значно скоротити кількість дроселів в каналах кожного компонента і особливо у каналі метану. Наприклад, щоб розчинити чистий компонент в 100 разів (до 1 %об.) в схемі (рис.1) потрібно забезпечити один КЕ в каналі чистого компонента і 99 КЕ в каналі газу-розчинника (метану), а в двостадійній схемі для такого ж розчинення необхідно забезпечити по одному КЕ на

першій і другій стадіях в каналі компонента і по 9 КЕ в каналі метану. Отже, в такому випадку кількість дроселів зменшується в 5 разів.



1 – капілярний елемент; 2 – пакет дросельних елементів; 3 – змінний пакет дроселів

Рис.2. Принципова схема газодинамічного синтезатора, побудованого з використанням схеми багатостадійного (чотиристадійного) розчинення чистих компонентів.

Аналогічний ефект дає тристадійна схема розчинення компонента, яка дозволяє виходити на рівень малих концентрацій. Наприклад, щоб розчинити чистий компонент в 1000 разів (до 0,1 %об.) при одностадійному розчиненні необхідно забезпечити один КЕ в каналі чистого компонента і 999 КЕ в каналі газу-розчинника. При застосуванні тристадійного розчинення потрібно по одному КЕ в каналі чистого компонента на кожній стадії і по 9 дроселів в кожному пакеті в каналах метану.

Отже застосування схем багатостадійного розчинення дозволяє скоротити кількість дроселів з декількох десятків тисяч до декількох десятків.

Принципова схема газодинамічного синтезатора, яка зображена на рис. 2, взята за основу для побудови змішувача для приготування синтетичного природного газу. Ця схема передбачає чотири стадії розчинення компонентів: на першій і другій стадіях всі супутні метану компоненти розчиняються чистим метаном, на третій стадії шляхом змішування бінарних сумішей попередніх стадій відбувається додаткове розчинення супутніх компонентів, а на четвертій стадії отримана газова суміш додатково розчиняється метаном. Змінний пакет дроселів 3 дозволяє змінювати концентрацію всіх компонентів синтетичного природного газу. В залежності від кількості КЕ в каналі змінного пакета дроселів 3 отримуємо певну кількість сумішей для перевірки хроматографа. За такою схемою більшість

компонентів, зокрема, етан, пропан, *n*-бутан, водень, азот, кисень і вуглекислий газ проходять на одну стадію розчинення менше, ніж всі інші супутні компоненти. Окремо від інших компонентів розчиняється гексан, оскільки він має значно вищу порівняно з рештою компонентів синтезованої суміші температуру кипіння і тому для переведення гексану в газоподібний стан його потрібно нагріти до температури вище 348 К.

У випадку необхідності оцінки взаємовпливу компонентів в каналах компонентів необхідно встановити змінні пакети дроселів, в результаті чого кількість синтезованих сумішей значно зростає.

Для зменшення в пакеті кількості КЕ паралельно з'єднані дроселі можна замінити еквівалентними кратними дроселями, тобто такими дросельними елементами, які забезпечують таку ж витрату, як і декілька замінюваних паралельно з'єднаних дроселів.

Отже, використання запропонованих газодинамічних синтезаторів дозволить: забезпечити приготування перевірочальних газових сумішей (синтетичного природного газу) у всьому діапазоні зміни значень концентрацій кожного з компонентів природного газу; вивчити взаємовплив компонентів на результати вимірювань хроматографа; підвищити точність визначення теплотворної здатності і кількості природного газу.

1. ГОСТ 5542–87. Газы горючие природные для промышленного и коммунально-бытового назначения. Технические условия. - М.: Изд-во стандартов, 1987. 2. Рибачок Б. М. Основні технології та промислова екологія /Приклади і задачі/: Навч. посібник для втузів. – К.: 1997. – 159с. 3. Авдеева А. А. Контроль сжигания газообразного топлива. - М.: Энергия, 1971. – 256 с. 4. Белосельский Б. С., Соляков В. К. Энергетическое топливо. - М.: Энергия, 1980. – 169 с. 5. ГОСТ 10062–75. Газы природные горючие. Метод определения удельной теплоты сгорания. - М.: Изд-во стандартов, 1975. 6. ГОСТ 27193–86. Газы

горючие природные. Метод определения теплоты сгорания водяным калориметром. - М.: Изд-во стандартов, 1986. 7. А.с. № 1589175 (СССР) Способ непрерывного определения теплоты сгорания топлива. В.И.Соловьев В.В.Упадышев, В.А.Рыков и С.Г.Шуринов. Опубл. Б.И. 1989, № 25. 8. Измерения в промышленности: Справочник: в 3 кн. Кн.3. Пер. с нем./Под ред. Профоса П. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Металлургия, 1990. - 344 с. 9. ГОСТ 23781–87. Газы горючие природные. Хроматографический метод определения компонентного состава. - М.: Изд-во стандартов, 1987. 10. Коллеров Д.К. Газоанализаторы. Проблемы практической метрологии. - М.: Изд-во стандартов, 1980. - 176 с. 11. ГОСТ 20220-74. Приборы газоаналитические промышленные автоматические непрерывного действия. - М.: Изд-во стандартов, 1976. 12. Apparatus for preparing gas mixtures from constituents taken in a given proportion. Патент США № 4915123. Morgovsky G.A., Pistun E.P., Terljukh Z.N., Sankin Ya. L. 13. А.с. № 1769212 (СССР). Делитель газового потока. Е.П. Пистун, З.Н.Теплюх, И.В. Дилай и Я.Г.Друль. Опубл. Б.И. 1992, № 38. 14. С.П.Пистун, З.М. Теплюх, Я.Г.Друль, I.В.Ділай. Лінійні подільники тиску та їх використання в контрольно-вимірчальній техніці. //Контрольно-вимірчальна техніка. – Львів: 1993, вип. 50, С. 45-48. 15. З.Н. Теплюх, И.В.Дилай. Компенсация влияющих факторов в газодинамических синтезаторах газовых смесей. //Гидропривод и гидropневмоавтоматика. - Киев: 1991, вып.27, С.69-75. 16. Е.П.Пистун, З.Н. Теплюх, И.В.Дилай и Я.Г.Друль. Линейные газодинамические дроссели и их применение. //Контрольно-измерительная техника. Львов, 1990, вып. 47, С.58-61. 17. А.с. № 1552864 (СССР). Система для установления равенства газодинамических сопротивлений дросселей. Е.П.Пистун, З.Н.Теплюх, И.В.Дилай. 18. А.с. № 1760406 (СССР). Способ подбора дросселей с равными газодинамическими сопротивлениями. Е.П.Пистун, З.Н.Теплюх, И.В. Дилай и Я.Г. Друль. Опубл. Б.И. 1992, № 33.