

УДК 681.2.53.082:543.27

ПРИСТРІЙ ДЛЯ ПРИГОТУВАННЯ ШТУЧНОГО ПРИРОДНОГО ГАЗУ

© Теплох З.М., Ділай І.В., 2004

Національний університет "Львівська політехніка"

Запропонована схема синтезатора штучного природного газу, який може бути використаний, зокрема, для градуювання хроматографів, у системі визначення витрати (кількості) отриманої/відпущеної з газом енергії, а також методика побудови синтезаторів для дослідження впливу супутніх компонентів

Практика обліку природного газу як енергоносія сьогодні полягає, по суті, в контролі його витрати (кількості), а контролю його якості приділяється неналежна увага. Це твердження можна оспорювати оскільки є регламентована нижня межа калорійності природного газу [1]. Але нормування лише нижньої межі калорійності не сприяє налагодженню нормальних ринкових взаємовідносин між постачальником і споживачем, а лише виконує функцію захисту споживача.

Різниця калорійності природного газу із різних родовищ може сягати десяти і більше відсотків [2], що є основною причиною непостійності складу, калорійності та інших параметрів газу, який поступає до споживача. Очевидно, що споживач зацікавлений в отриманні більш калорійного палива, а постачальник - в подачі палива не вище встановленої нижньої межі калорійності. Оскільки на практиці немає змоги забезпечити подачу природного газу регламентованої калорійності (тобто рівно $31,8 \text{ МДж/м}^3$), то в інтересах постачальника є обліковувати надлишкову енергетичну вартість поданого споживачу природного газу, а споживач зацікавлений платити за природний газ одержаної якості. Звідси випливає, що облік природного газу як енергоносія необхідно здійснювати не в м^3 , а в Дж. Слід також зауважити, що цей висновок не суперечить доцільності підвищення точності вимірювання витрати, більше того, точніше вимірювання витрати (кількості) газу тільки сприятиме, в кінцевому рахунку, підвищенню точності обліку природного газу за його реальною енергетичною вартістю.

Контроль енергетичної вартості природного газу можна здійснювати різними методами, зокрема, за допомогою різних типів калориметрів. При вимірюванні витрати енергоносія доцільним є визначення енергетичної вартості розрахунково через концентрацію компонентів. Для визначення компонентного складу природного газу найбільш поширеним і визнаним методом в багатьох країнах світу є хроматографічний метод [3]. Однею із важливих переваг

цього методу є те, що за отриманими результатами аналізу (компонентним складом природного газу) можна також розрахувати його густину, коефіцієнт стискуваності та інші параметри, необхідні при обчисленні витрати природного газу, що в свою чергу підвищує точність визначення витрати енергії.

Визначальною особливістю хроматографа як вимірювального приладу є наявність в ньому аналітичного блоку, в якому відбувається перетворення аналізованої газової суміші в цілком іншу суміш (суміш з розподіленими в просторі та часі концентраціями компонентів у газі-носії), яка надходить на детектор фізичних властивостей. У зв'язку із цим хроматограф потребує постійного підтвердження його градуювальних характеристик [4]. При цьому слід нагадати, що всі методи якісного градуювання вимагають або застосування чистих газів, або атестованих газових сумішей.

Калібрування хроматографа в загальному випадку вимагає чотирьох перевірювальних сумішей для кожного компонента аналізованої суміші. При цьому ці чотири суміші повинні мати різний вміст визначального компонента (в усьому діапазоні можливих змін концентрації даного компонента) і ті ж концентрації супутніх компонентів, що є практично неможливим при використанні перевірювальних газових сумішей в балонах. Природний газ містить більше 10 компонентів, тому для калібрування хроматографа на природний газ потрібно біля 50 різних перевірювальних сумішей. Тепер такі суміші готують, в основному, методом парціальних тисків в балонах. Тому для перевірки хроматографа на природний газ потрібно цілий парк балонів, що є нереальним. При всіх своїх перевагах балонний метод перевірки є достатньо дорогим та трудомістким, крім цього, не всі газові суміші в балонах високого тиску можна отримати та зберігати в балонах. Особливо ці застереження стосуються газових сумішей з малими та мікроконцентраціями компонентів, тому що їхні концентрації змінюються в часі при зберіганні. У зв'язку з вказаним на практиці калібрування

відбувається в кращому випадку кількома сумішами, тобто по одній-двох точках для кожного компонента, що суперечить методикам, прийнятим в газовому аналізі та призводить до неякісного градування.

Вказані недоліки балонних методів зумовили появу газодинамічних змішувальних пристроїв (синтезаторів), які доцільно застосовувати для метрологічного забезпечення хроматографа на природній газ, оскільки вони дозволяють градувати хроматограф за кількома точками діапазону зміни концентрації кожного компонента при постійних концентраціях інших компонентів, а також оцінити вплив супутніх компонентів на градувальну характеристику кожного компонента [5].

Серед відомих газодинамічних синтезаторів найбільш перспективними є синтезатори, побудовані на базі дозування компонентів за допомогою дросельних елементів. Принципова схема і конструкція таких синтезаторів можуть суттєво різнитися в залежності від складу суміші та діапазонів концентрацій її компонентів, точності задання концентрацій, кількості продукованих сумішей, витрати і тиску суміші на виході синтезатора, можливих змін параметрів зовнішнього середовища і споживача тощо. Для забезпечення високих метрологічних і експлуатаційних характеристик синтезатора нами розроблені принципи побудови таких газозмішувальних пристроїв, основні з яких описані далі. Розроблені нами синтезатори запатентовані в індустріально розвинутих країнах [6-9] і їх доцільно використовувати для перевірки газоаналітичної апаратури, зокрема при контролі складу природного газу.

Принципи побудови високоточних, надійних і технологічних газодинамічних синтезаторів газових сумішей із змінним компонентним складом є наступними:

- будівництва синтезатора за схемою суматора потоків;
- встановлення в каналах компонентів пакетів із змінною кількістю увімкнених дроселів;
- багатостадійне розчинення для одержання низьких концентрацій компонентів;
- однакові та стабільні умови дроселювання компонентів синтезованої суміші;
- застосування як дроселів капілярних елементів (скляних капілярних трубок);
- компенсація факторів впливу, зокрема тисків та температур;
- застосування дроселів з рівновеликими опорами на одному і різних газах;
- застосування еквівалентних дроселів з кратним значенням опору.

Запропоновані принципи побудови газодинамічних синтезаторів газових сумішей із заданим компонентним складом реалізовані в кількох конк-

ретних розробках синтезаторів, зокрема, в синтезаторі суміші O_2-N_2 для перевірки газоаналізаторів на кисень в димових газах [10] і в синтезаторі штучного природного газу для калібрування хроматографів [5]. Розглянуті далі схеми синтезаторів є подальшим розвитком ідей, методів та принципів, використаних у вказаних розробках.

На рис. 1 показана схема формування сумішей компонентів синтезатора, на виході якого утворюється суміш, що за своїм складом і властивостями є аналогом природного газу і яка завдяки відомому з високою точністю складу придатна для градування хроматографів. На даній схемі показані тільки пакети дроселів (або окремі дроселі) 1,...,5, пакет 6 із змінною кількістю увімкнених дроселів (див. рис. 2) і канали, що з'єднують ці дроселі з входами чистих компонентів синтезованої суміші між собою, виходом готової суміші і скидом надлишку проміжної суміші. На схемі не показані комутуючі елементи, а також призначені для підвищення точності синтезування елементи систем термостабілізування і теплообміну, елементи стабілізування тисків тощо, які могли б затінити картину синтезу.

Конфігурація схеми визначається особливістю складу природного газу. У зв'язку з тим, що концентрація метану набагато перевищує концентрації всіх інших компонентів у схемі передбачено розчинення всіх решти компонентів метаном у кілька стадій. Перша стадія розчинення для всіх компонентів побудована ідентично – кожний чистий компонент з допомогою суматора потоків, побудованого на базі дросельних елементів 1 і 2, розчиняється до рівня макроконцентрації (див. табл. 1). Газодинамічний опір дросельних елементів 2 у каналах тих компонентів, які є у природному газі на рівні мікроконцентрацій, визначений як базовий, тобто опори в каналах пропану, бутанів, пентанів, гексану і кисню є рівновеликими. Тому у цих каналах фактично встановлено по одному дроселю. Газодинамічні опори дросельних елементів 2 у каналах інших компонентів (етан, водень, азот, вуглекислий газ) є кратними (у відповідну кількість разів меншими) в порівнянні із опором базового дроселя і тому в них встановлені пакети з відповідною кількістю базових дроселів (див. табл. 2). Замість будь-якого пакету, побудованого згідно з рис. 2а, може бути встановлений один дросель, еквівалентний за опором відповідній кількості базових дроселів. У каналах метану всіх суматорів першої стадії встановлені пакети дроселів 1, які за значенням опору також є кратними (у відповідну кількість разів меншими) опору базового дроселя (рис. 1). Підбір величини опору пакета 1 (тобто кратності відносно опору базового дроселя) у каналах метану забезпечує необхідне співвідношення витрат чистих компонентів і метану, а тим самим

задану концентрацію компонентів після першої стадії розчинення. В каналах метану також доцільне

встановлення одного еквівалентного дроселя замість пакета.

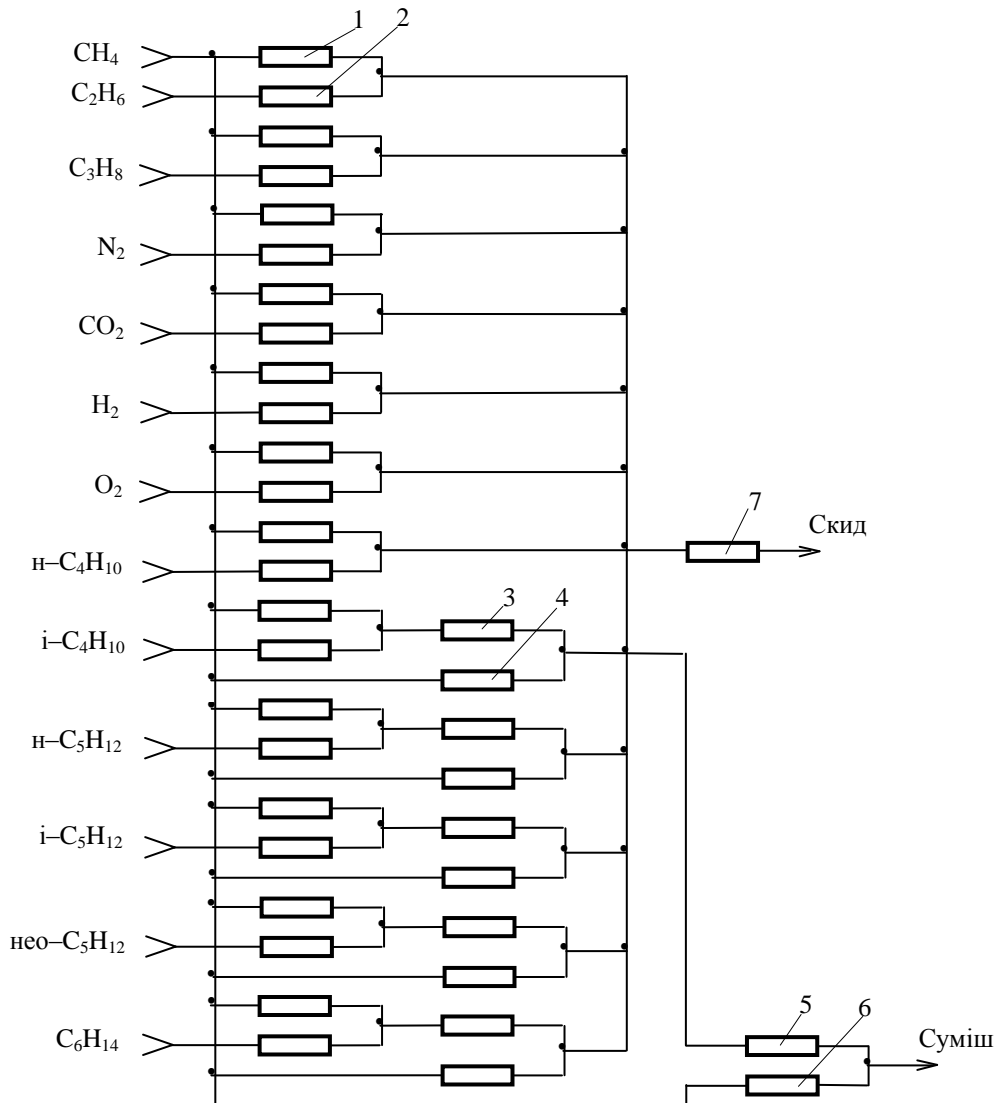


Рис. 1. Принципова схема газових потоків синтезатора штучного природного газу

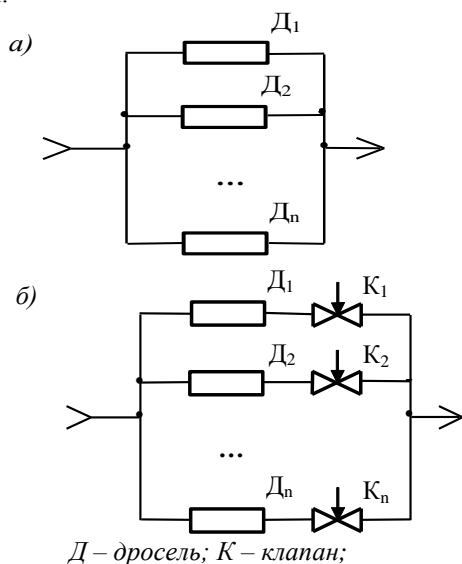
Друга стадія призначена для глибшого розчинення і-бутану, пентанів та гексану і побудована також за допомогою суматорів потоків, складених з дросельних елементів 3 і 4 відповідно в каналах розчиненого на першій стадії компонента і чистого метану. При цьому всі дросельні елементи 3 виконані у вигляді окремих дроселів, а елементи 4 - у вигляді пакетів, або окремих еквівалентних дроселів. Концентрації компонентів на виході другої стадії та співвідношення опорів дросельних елементів 3 і 4 показані в табл. 1 і табл. 2.

Третя стадія розчинення має місце внаслідок змішування всіх сумішей після другої стадії та сумішей типу компонент-метан, які не мають другої стадії. Внаслідок такого змішування концентрація всіх компонентів природного газу (крім метану) по-

нижується до рівня верхньої границі можливого їх вмісту у даній суміші, натомість концентрація метану наближається відповідно до рівня нижньої границі можливого його вмісту (див. табл. 3, колонка $n=0$).

Остання четверта стадія розчинення призначена для одержання сумішей з різними концентраціями компонентів в усьому діапазоні можливих їх змін у природному газі. На цій стадії суміш після третьої стадії розчиняється метаном за допомогою суматора потоків, складеного з дросельних елементів 5 і 6. При цьому дросельний елемент 5 виконаний у вигляді окремого капіляра, а елемент 6 - у вигляді пакета із змінною кількістю увімкнених капілярів згідно з рис. 2б. Капіляри дросельного елемента 6 можуть бути виконані з опором рівним опору елеме-

нта 5, але в цьому випадку для розширення діапазону зміни концентрацій компонентів потрібна значна кількість капілярів, наприклад, $n=32$ (табл. 3). У випадку застосування еквівалентних дроселів кількість капілярів в пакеті можна суттєво зменшити, наприклад, при $n=7$ одержати ті ж суміші, що і показані в табл. 3, а крім того ще 25 проміжних варіантів сумішей.



а) – постійного опору; б) – з дискретно змінюваним опором

Рис. 2. Пакет дроселів з n -кратною провідністю

У схемі синтезатора застосований також подільник витрати, побудований за допомогою капіляра 5 і пакета капілярів 7, необхідний для забезпе-

чення потрібної витрати суміші на виході схеми. Співвідношення опорів капіляра 5 і пакета 7 визначає надлишок суміші, що надходить на скид.

На значення концентрацій компонентів приготованої газової суміші за допомогою запропонованого синтезатора суттєвий вплив можуть чинити температури навколишнього середовища і чистих газів в балонах. Тому температура в приміщенні повинна підтримуватися на рівні, наприклад, 22 ± 2 °С, балони з чистими газами мають бути витримані у даному приміщенні не менше доби, температура повітря всередині корпусу синтезатора має бути стабілізована з точністю $\pm 0,2$ К, має бути забезпечений достатній для доведення температури чистих газів до рівня температури всередині корпусу синтезатора теплообмін між потоками компонентів та повітрям в синтезаторі, а крім того забезпечені умови термокомпенсації відповідним вибором геометричних розмірів капілярів. Система термостабілізації включає в себе високостабільний термометр з похибкою $\pm 0,05$ К, позиційний регулятор температури, нагрівний елемент, вирівнювач температури (вентилятор) і теплообмінники. Деякі ускладнення при цьому виникають внаслідок високої температури кипіння гексану ($68,75$ °С), що викликає необхідність або окремої системи термостабілізації живильного балону і першої стадії розчинення, або підвищення температури стабілізації всередині корпусу синтезатора вище температури кипіння гексану. В цілому весь вказаний комплекс заходів практично усуває вплив температури на склад синтезованої суміші.

Таблиця 1 – Концентрації компонентів після першої та другої стадій

№ п/п	Компонент	Вміст компонента в каналі, %об	
		після першої стадії	після другої стадії
1	етан	60	–
2	пропан	33,3	–
3	н-бутан	5,88	–
4	і-бутан	10,0	3,33
5	н-пентан	10,0	1,11
6	і-пентан	10,0	3,33
7	нео-пентан	10,0	1,11
8	гексан	10,0	1,11
9	водень	40	–
10	азот	45	–
11	кисень	11,1	–
12	вуглекислий газ	28,57	–

Таблиця 2 – Кількість дроселів у каналах першої та другої стадій

№ п/п	Канал	Стадія 1		Стадія 2	
		канал чистого компонента	канал метану	канал суміші з виходу стадії 1	канал метану
1	етан	3	2	–	–
2	пропан	1	2	–	–
3	н-бутан	1	16	–	–
4	і-бутан	1	9	1	2
5	н-пентан	1	9	1	8
6	і-пентан	1	9	1	2
7	нео-пентан	1	9	1	8
8	гексан	1	9	1	8
9	H ₂	2	3	–	–
10	N ₂	9	11	–	–
11	O ₂	1	8	–	–
12	CO ₂	2	5	–	–

Таблиця 3 – Варіанти сумішей на виході синтезатора

№ п/п	Компонент	Вміст компонента в суміші, %об.							
		n = 0	n = 1	n = 2	n = 4	n = 8	n = 16	n = 24	n = 32
1	CH ₄	80,974	90,483	93,659	96,195	97,887	98,861	99,239	99,424
2	C ₂ H ₆	4,750	2,375	1,583	0,950	0,528	0,279	0,190	0,144
3	C ₃ H ₈	2,775	1,388	0,926	0,555	0,309	0,164	0,113	0,084
4	н-C ₄ H ₁₀	0,490	0,250	0,163	0,098	0,054	0,029	0,019	0,016
5	і-C ₄ H ₁₀	0,309	0,154	0,103	0,061	0,034	0,018	0,012	0,009
6	н-C ₅ H ₁₂	0,103	0,051	0,034	0,021	0,011	0,006	0,004	0,003
7	і-C ₅ H ₁₂	0,309	0,154	0,103	0,061	0,034	0,018	0,012	0,009
8	нео-C ₅ H ₁₂	0,103	0,053	0,034	0,021	0,011	0,006	0,004	0,003
9	C ₆ H ₁₄	0,103	0,051	0,034	0,021	0,011	0,006	0,004	0,003
10	H ₂	2,778	1,389	0,926	0,556	0,309	0,163	0,111	0,084
11	N ₂	4,000	2,000	1,333	0,800	0,444	0,256	0,160	0,121
12	O ₂	0,925	0,462	0,308	0,185	0,103	0,054	0,037	0,028
13	CO ₂	2,381	1,190	0,794	0,476	0,265	0,140	0,095	0,072

Для забезпечення високої точності синтезу необхідно усунути також впливи зміни тисків живлення кожного компонента, навантаження і тиску на виході синтезатора, а також барометричного тиску. Ця задача вирішується за допомогою системи стабілізування тисків на входах чистих компонентів і виході синтезованої суміші, побудованої на базі стабілізаторів абсолютних тисків та повторювачів тисків, а також за допомогою застосування лінійних подільників тиску, що підтримує однаковими міждросельні тиски подільників і компенсує неточності роботи стабілізаторів абсолютних тисків.

Оцінка похибок синтезатора була виконана з урахуванням похибок підгонки опорів дроселів однакового опору, похибок впливу завод, а також з урахуванням чистоти газів у балонах [11,12]. Так, зокрема, відносна похибка концентрацій компонентів з найменшим вмістом у синтезованому газі не

перевищує 0,1 %, а компонентів, вміст яких є на рівні макроконцентрацій – 0,01 %.

В цілому описаний синтезатор штучного природного газу із змінними і точно заданими концентраціями компонентів внаслідок необхідності його прецизійного виконання і великої кількості використовуваних компонентів є достатньо складним і трудомістким при виготовленні. Тому в багатьох випадках можуть бути доцільними для застосування його спрощені варіанти з використанням меншої кількості компонентів, продуковані суміші яких проте дуже мало відрізняються за своїми фізико-хімічними властивостями від властивостей відпускового природного газу. Це стосується в першу чергу теплотворної здатності такого штучного газу, що разом з витратою є визначальним для обчислення реально відпущеної (спожитої) енергії. Серед різних можливих таких варіантів найперспективнішими є

синтезатор на основні компоненти природного газу (CH_4 , C_2H_6 , C_3H_8 , CO_2 , N_2) і синтезатор на основі горючої компоненти (CH_4 , C_2H_6 , C_3H_8). Ці варіанти є набагато простішими в реалізації та забезпечують градування хроматографа по тих компонентах, які фактично і складають основу природного газу. Далі, як приклад, опишемо схему такого синтезатора на основні компоненти природного газу.

Метан, етан, пропан, вуглекислий газ і азот складають основу природного газу, їх загальний вміст у відпускному газі складає, як правило, 99,8...99,9 %. Решта компонентів природного газу є на рівні мікроконцентрацій і на даному етапі у зв'язку з похибками вимірювання витрати практично не впливають на визначення теплотворної здатності газу.

На рис. 3 показана схема синтезатора, на виході якого утворюється суміш, яка завдяки відомому з високою точністю складу придатна для градування хроматографів природного газу і одночасно для оцінювання впливу супутніх компонентів.

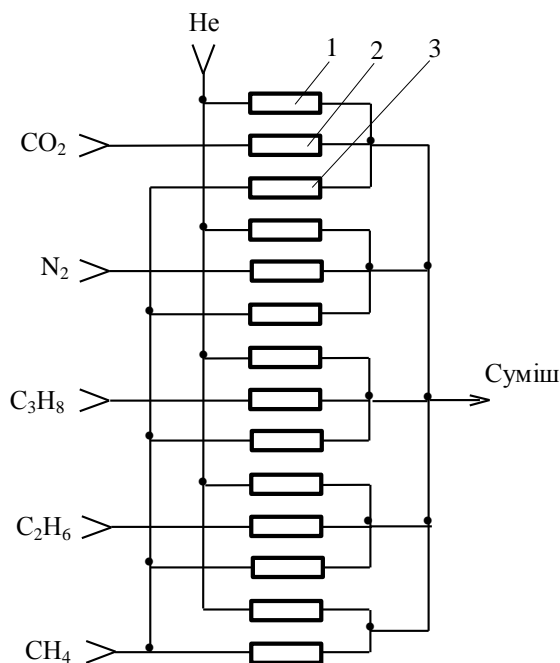


Рис. 3. Принципова схема газових потоків синтезатора основних компонентів природного газу

Ця схема має порівняно із схемою на рис. 1 кілька суттєвих відмінностей: кількість чистих компонентів природного газу на вході зменшена до п'яти основних; для дослідження впливу супутніх компонентів введений як додатковий компонент гелій; у зв'язку з відсутністю компонентів на рівні мікроконцентрацій розчинення відбувається тільки у дві стадії; кожен суматор має у своєму складі два пакети із змінною кількістю увімкнених дроселів (для компонента і для гелію); чотири суматори го-

тують трикомпонентну суміш компонент-метангелій і тому мають додатковий пакет капілярів постійного опору (або окремий капіляр еквівалентного опору) для метану; схема дозволяє градувати хроматограф за зміною лише одного компонента (одночасна зміна концентрації гелію як газу-носія не впливає на співвідношення піків хроматограми).

Перша стадія розчинення для всіх компонентів (крім метану) здійснюються за допомогою суматорів потоків, побудованих на базі дросельних елементів: 1 – для гелію; 2 – для компонента; 3 – для метану. Один суматор побудований лише на двох дросельних елементах 1 і 3. Друга стадія розчинення має місце внаслідок змішування всіх сумішей після першої стадії, внаслідок чого концентрації всіх компонентів суміші доводяться до рівня їх концентрацій у природному газі.

Співвідношення газодинамічних опорів дросельних елементів 2 і 3 всіх суматорів визначає конкретні значення концентрацій компонентів синтезованої суміші. Для зміни концентрації одного із компонентів необхідно змінити опір відповідного пакету капілярів 2, а також одночасно змінити на таку ж величину але в протилежному напрямку опір пакету 1 цього ж суматора. Очевидно, що при цьому капіляри пакетів 1 і 2 мають бути попарно рівновеликими за опором, а значення опорів капілярів у пакеті залежать від діапазону можливих концентрацій компонента у природному газі. При такій побудові схеми в кожному пакеті встановлено по чотири еквівалентних дроселі для отримання градувальної кривої за чотирма точками.

Системи стабілізації температури і тисків побудовані так само, як і в синтезаторі на рис. 1, але є дещо простішими: перша внаслідок відсутності гексану, а друга внаслідок відсутності подільників тиску. Загальна похибка приготування суміші є на такому ж рівні.

- ГОСТ 5542-87. Газы горючие природные для промышленного и коммунально-бытового назначения. Технические условия. – М.: Изд-во стандартов, 1987. – 4 с.
- Справочник химика-энергетика. Энергетическое топливо (характеристика и контроль качества). М.: Энергия. - 343 с.
- Хроматографический метод определения компонентного состава природного газа. Е.А.Хацкевич, Т.А.Попова. // Газовая промышленность, №4, 1999, С.28-29.
- Коллеров Д.К. Газоанализаторы. Проблемы практической метрологии. – М.: Изд-во стандартов, 1980. 176 с.
- Теплюх З.М., Ділай І.В. Метрологічне забезпечення хроматографа контролю складу природного газу // Методи та прилади контролю якості, №7, 2001, С. 142-146.
- Dispositif pour la preparation des melanges gazeux a concentration predeterminee des com-

- posants. Пат. Франції 8805694. Morgovsky G.A., Pistun E.P., Tepljukh Z.N., Sankin Ya. L. 7. Apparatus for preparing gas mixtures from constituents taken in a given proportion. Патент США 4915123. Morgovsky G.A., Pistun E.P., Tepljukh Z.N., Sankin Ya. L. 8. Anordning for beredning av gasblandningar med forutbestamd componentkoncentration. Патент Швеції 8801331-3. Morgovsky G.A., Pistun E.P., Tepljukh Z.N., Sankin Ya. L. 9. Apparatus for preparing gas mixtures from constituents taken in a given proportion. Патент Японії № 63- 88342. Morgovsky G.A., Pistun E.P., Tepljukh Z.N., Sankin Ya. L. 10. Теплох З.М. Синтезатори газових сумішей для перевірки аналізаторів складу димових газів // Методи та прилади контролю якості, №8, 2002, С. 83-85. 11. Івахів О.В., Теплох З.М. Підгонка опору дроселів за допомогою газодинамічного моста // Вісник НУ“ЛП” № 475 “Автоматика, вимірювання та керування”, 2003, С. 15-21. 12. Бобылев А.В. Требования к чистым газам как исходным компонентам образцовых газовых смесей // Измерительная техника №5, 1986, С. 54-55.

УДК 532.612.3

РОЗВ'ЯЗОК РІВНЯННЯ ДИФУЗІЇ ШЛЯХОМ ЙОГО ЗВЕДЕННЯ ДО РІВНЯННЯ СТАНУ У СТАНДАРТНІЙ ФОРМІ ПРИ МОДЕЛЮВАННІ ПРОЦЕСІВ РОЗПОВСЮДЖЕННЯ ВКЛЮЧЕНЬ У СЕРЕДОВИЩІ

© Малько О. Г., Кісіль І.С., Дранчук М.М. 2004

Івано – Франківський національний технічний університет нафти і газу

Запропонований метод чисельного розв'язку рівняння дифузії шляхом його зведення до рівнянням стану у стандартній формі при моделюванні процесів розповсюдження включень з метою методологічного обґрунтування контролю якісного та кількісного складу речовин на основі капілярних методів, а також вирішенні задачі моніторингу і прогнозування розповсюдження шкідливих домішок у водному середовищі

Методологічне обґрунтування ряду задач вимірювання, контролю, моніторингу та прогнозування потребує вирішення питань розповсюдження в часі домішок у середовищах, що потребує моделювання процесів масообміну шляхом розв'язку диференціальних рівнянь параболічного типу, інакше рівнянь дифузії [1]. У даному випадку необхідність побудови таких моделей виникла при вирішенні проблеми методологічного обґрунтування контролю якісного та кількісного складу речовин на основі капілярних методів [2], а також проблеми моніторингу і прогнозування розповсюдження шкідливих домішок у водному середовищі [3]. Об'єднання їх у одну групу обумовлене спільністю постановочної частини. Проведені дослідження моделей структур поверхонь розділу фаз проведені у роботі [2] дають основу для визначення квазікрайових умов при моделюванні процесів масопереносу включень з об'ємної фази у поверхневий шар. Розв'язок задачі масопереносу у процесі насичення поверхневого шару дає можливість теоретично обґрунтувати динаміку міжфазного натягу в залежності від кількісного і якісного складу контактуючих фаз. Крім того, деякі параметри структури поверхневого шару мають непрямий вплив на поведінку динамічної характеристики поверхневого

натягу, що дає додаткову інформацію для якісного контролю речовин.

Спільною специфікою формулювання таких задач при вирішенні вказаних проблем, є те, що граничні (крайові) умови у свою чергу є функцією не тільки часу, а і значень самого параметру, що визначається. Крім того, тут необхідно враховувати функцію впливу на значення шуканого параметру у просторі і часі. Застосування стандартних чисельних методів (апроксимація різницевиими рівняннями) у таких випадках є малоефективним із-за проблем збіжності і стійкості, а також складності постановки задачі. Представлення задачі рівням стану у стандартній формі є набагато інформативнішим, так як тут чітко визначені змінна стану і вхідний вплив. Також значно спрощується алгоритм обчислень – багатократний розв'язок систем лінійних рівнянь в процесі зміни граничних (крайових) умов у часі тут замінено однократним обчисленням перехідної матриці стану, що дає можливість імітаційного моделювання у реальному часі.

В загальному задачу масопереносу можна сформулювати наступним чином. Якщо у деякій просторово-часовій точці (x, y, z, t) позначити компоненти вектора швидкості руху рідини \bar{V} по осях