



УКРАЇНА

(19) UA

(11) 62010

(13) C2

(51) 7 G01N27/00

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ  
І НАУКИ УКРАЇНИДЕРЖАВНИЙ ДЕПАРТАМЕНТ  
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ  
ВЛАСНОСТІОПИС  
ДО ПАТЕНТУ НА ВИНАХІД

## (54) СПОСІБ ВИМІРЮВАННЯ КОНЦЕНТРАЦІЇ РЕЧОВИНИ

1

(21) 2001063854

(22) 07 06 2001

(24) 15 12 2003

(46) 15 12 2003, Бюл. № 12, 2003 р

(72) Бех Александр Дмитриевич, Чернецький Віктор Васильович, Бабенко Микола Климентійович, Єлшанський Вячеслав Вячеславович

(73) ІНСТИТУТ КІБЕРНЕТИКИ ІМ. В. М. ГЛУШКОВА НАН УКРАЇНИ

(56) Измерения в промышленности. Справ., кн. 3. Способы измерения и аппаратура - М. Металлургия, 1990 - 344с

(57) Спосіб вимірювання концентрації речовини (газу, рідини), який ґрунтується на тепловій взаємодії термочутливого елемента з речовиною і залежності теплопровідності і теплоємності речовини від її концентрації, який полягає в розміщенні першого малоінерційного твердотілого вимірювального перетворювача температури з термозалежним електричним опором в зразковій речовині, розміщенні аналогічного другого малоінерційного вимірювального перетворювача температури в досліджуваній речовині, одночасному нагріванні першого і другого вимірювальних перетворювачів електричним струмом до стаціонарної температури,

2

ри, перетворенні температури нагріву вимірювальних перетворювачів в електричний опір, а різниці температур в інформаційний сигнал, який дискретизують, квантують і перетворюють в цифрове значення, по якому оцінюють концентрацію речовини, який відрізняється тим, що вимірювальні перетворювачі температури збуджують гармонічним сигналом струму низької частоти, нагрівання перетворювачів здійснюють електричним струмом ступінчастої форми, на інтервалі часу теплового перехідного процесу, коли вимірювальні перетворювачі нагріваються до стаціонарної температури, різницю їх опору перетворюють в фазорізницеві синусоїдальні сигнали напруги, а останні - в інтервали часу, які дискретизують, квантують і перетворюють в цифрове значення, на інтервалі часу теплового перехідного процесу з частотою гармонічного сигналу збудження створюють потік цифрової інформації про різницю температури нагріву першого і другого вимірювальних перетворювачів і реєструють його, по змінах потоку цифрової інформації оцінюють інтенсивність, швидкість і коливальний характер термодинамічного процесу, по одержаних параметрах визначають величину концентрації речовини

Спосіб, що заявляється, відноситься до вимірювальної техніки і стосується аналізу концентрації речовини. Вміст однієї речовини в іншій визначається вимірюванням величини параметрів теплової взаємодії з речовиною, температура якої контролюється.

Концентрація речовини відноситься до фізичних параметрів, які незадовільно сприймаються органами відчуття людини. Тому для визначення концентрації речовини майже не використовують операції взаємодії речовини з органами відчуття людини, а вимірюють параметри природних процесів взаємодії електромагнітних, електричних, теплових.

Множина аналізованих речовин і широкий діапазон вимірювання концентрації обумовили виникнення численних і надзвичайно різноманітних способів вимірювання концентрацій, заснованих на всіляких фізико-хімічних явищах і властивостях речовини. Багато які способи вимірювання концен-

трації речовини засновані на порівнянні властивостей аналізованого об'єкта з мірою властивостей і наступним переходом до визначення концентрації по відомій залежності склад-властивість.

Відомі електрокондуктометричні способи вимірювання концентрації речовини, які основані на залежності електропровідності речовини від її складу і концентрації окремих компонентів [Левшина Е.С., Новицкий П.В. Электрические измерения физических величин. Измерительные преобразователи - Л. Энергоатомиздат, - 1983]. Кулонометричний спосіб заснований на вимірюванні струму або кількості електрики при електролізі досліджуваної речовини. Теплові методи засновані на залежності теплових властивостей речовини теплопровідності і теплоємності від її складу і концентрації окремих компонентів, а також на визначенні температурних коефіцієнтів при різних фізико-хімічних фазових перетвореннях речовини. Теплові способи дуже часто використовуються для

(13) C2

(11) 62010

(19) UA

аналізу складу газів та рідини [Спектор С.А. Электрические измерения физических величин. Методы измерений - Л. Энергоатомиздат - 1987 - 320с]

Один з теплових методів вимірювання концентрації заснований на порівнянні теплопровідності речовин. Чотири чутливих термоелементи однако-вих розмірів з однаковим електричним опором розміщують в чотирьох маленьких камерах, дві з яких наповнені вимірювальним газом, а дві інші - порівняльним. Термочутливі елементи з термозалежним опором включають в плечі моста Утстона. Через термочутливі елементи пропускають однаковий постійний струм і нагрівають їх. У вимірювальних і порівняльних камерах знаходиться газ з різними теплопровідностями, тому термочутливі елементи нагріваються до різної температури, врівноваження моста порушується. Напругу в вимірювальній діагоналі моста дискретизують, квантують і перетворюють в цифрове значення. По цифровому значенню напруги в вимірювальній діагоналі моста оцінюють теплопровідність і концентрацію речовини. Для досягнення високої чутливості температура чутливих елементів повинна перевищувати температуру стінок камер більш як на 150°C. В такому разі можна досягти точність вимірювання 2,5%, а при низькій концентрації (1-2%) - 20%. Для підвищення чутливості необхідно підвищувати температуру нагріву термочутливих елементів.

Не дозволяє досягти поставленої мети те, що чутливість аналогу обмежена максимальною температурою нагріву термочутливих елементів, яка не перевищує кількох сот градусів. Другою причиною є високий рівень шумів на виході моста Утстона.

Найбільш поширеним з теплових методів є термокондуктометричний спосіб вимірювання концентрації [Измерения в промышленности. Справ. изд. в 3-х кн. Кн. 3. Способы измерения и аппаратура. Пер. с нем. / Под ред. Проф. П. - М. Металлургия, - 1990 - 344с]. Спосіб полягає в тому, що порівнюють дві на процес теплообміну двох речовин. Одна з них має відому концентрацію і при взаємодії з нагрітим тілом створює порівняльний тепловий процес, а друга є речовиною з невідомою концентрацією і створює вимірювальний процес. Різниця взаємодії вимірюється параметрами теплообміну порівняльного і вимірювального процесів. Вимірювання концентрації речовини в такому способі здійснюється по коефіцієнту теплопередачі - параметру процесу теплообміну, який пропорційний коефіцієнту теплопровідності речовини. Такий спосіб вимірювання концентрації речовини обґрунтовується формулою Ньютона для передачі тепла між двома тілами в тепловому режимі:

$$q = \alpha \Delta T^{\circ} \quad (1)$$

де  $q$  - питомий тепловий потік через одиничну площадку поверхні тіла,  $\alpha$  - коефіцієнт тепловіддачі, який характеризує інтенсивність теплообміну,  $\Delta T^{\circ}$  - різниця температур.

Термокондуктометричний спосіб вимірювання концентрації речовини найбільш близький до пропонуваного і тому вибраний як спосіб-прототип.

Спосіб-прототип характеризується такою по-

слідовністю операцій:

розміщують перший малоінерційний твердотільний вимірювальний перетворювач температури в зразковій речовині,

розміщують другий аналогічний перетворювач температури в досліджуваній речовині,

вимірювальні перетворювачі включають в плечі моста Утстона і нагрівають електричним струмом до стаціонарної температури, створюючи різницю температури між перетворювачем і речовиною,

перетворюють температуру нагріву перетворювачів в електричний опір,

різницю опорів першого і другого вимірювальних перетворювачів перетворюють в аналоговий сигнал напруги,

сигнал напруги дискретизують, квантують і перетворюють в цифрове значення,

по цифровому значенню амплітуди сигналу оцінюють коефіцієнт теплопередачі досліджуваної речовини,

по коефіцієнту теплопередачі визначають концентрацію речовини.

Відповідно до наведеної послідовності операцій і формули (1) оцінка концентрації речовини здійснюється тільки по одному параметру процесу теплообміну між двома тілами. Для підвищення чутливості способу необхідно підвищувати температуру нагріву вимірювальних перетворювачів, яка обмежена максимально допустимою температурою нагріву термочутливих елементів і речовини.

Згідно з (1) підвищити розрізняльну здатність і чутливість способу-прототипу можна підвищенням коефіцієнта тепловіддачі  $\alpha$ , або різниці температури  $\Delta T^{\circ}$ . Коефіцієнт  $\alpha$  є характеристикою речовини, а  $\Delta T^{\circ}$  обмежена максимально допустимою температурою нагріву вимірювальних перетворювачів. Обмеження максимальної температури нагріву вимірювальних перетворювачів і речовини є основною причиною, завдяки чому не можна підвищити розрізняльну здатність способу-прототипу.

В способі-прототипі використовується тільки один параметр процесу теплообміну між двома тілами. Для підвищення чутливості вимірювання концентрації речовини є можливість використати кілька параметрів теплового процесу.

Відповідно до дифузійної моделі конвекційного теплообміну динаміка процесу передачі температури від нагрітого тіла до менш нагрітого описується диференціальним рівнянням першого порядку:

$$T_{\theta}(t) = T(t) + \frac{mC}{\alpha S} \cdot \frac{dT(t)}{dt} \quad (2)$$

де  $T_{\theta}(t)$  - функція, яка зображує теплову дію джерела температури, що створює різницю температури між об'єктами теплової взаємодії,  $T(t)$  - функція, що зображує процес теплообміну, яку знаходять, розв'язавши диференціальне рівняння,  $m$  - маса тіла, що нагрівається в процесі теплообміну,  $C$  - його теплоємність,  $S$  - площа контактної поверхні між взаємодіючими об'єктами.

Порівнюючи рівняння (1) і (2), знаходимо, що можна створити спосіб вимірювання концентрації речовини, який використовує динаміку процесу передачі температури від нагрітого тіла до менш

нагрітого й описується рівнянням (2). Процес (2) характеризується двома компонентами  $C$  і  $\alpha$ . Тому використовуючи такий спосіб можна досягнути більш високої інформаційної, а отже і розрізняльної здатності вимірювання концентрації речовини.

В основу винаходу поставлено задачу створити такий спосіб вимірювання концентрації речовини, в якому використовуються кілька контролюємих параметрів теплообміну між двома тілами, в якому вимірюються і реєструються основні параметри динаміки теплообміну між термочутливим елементом і речовиною, що може привести до досягнення найвищої розрізняльної здатності і чутливості вимірювання концентрації речовини.

Спосіб вимірювання полягає в дії досліджуваної речовини невідомої концентрації на процес встановлення температури термочутливого елемента з термозалежним електричним опором. Процес зміни температури здійснюють шляхом нагрівання термочутливого елемента електричним струмом, тобто в результаті перетворення енергії електричного поля в провіднику в тепло як механічну форму енергії.

Поставлена задача досягається тим, в термодинамічному способі вимірювання концентрації речовини, який оснований на тепловій взаємодії термочутливого елемента з речовиною і залежності теплопровідності, теплоємності, а отже і температури нагріву термочутливого елемента від її концентрації. Цей спосіб вимірювання концентрації речовини характеризується такою послідовністю дій:

- розміщують перший малоінерційний твердотільний вимірювальний перетворювач температури з термозалежним електричним опором в зразковій речовині,

- розміщують аналогічний другий малоінерційний твердотільний перетворювач температури в досліджуваній речовині,

- перший і другий вимірювальні перетворювачі одночасно нагрівають електричним струмом ступінчастої форми до стаціонарної температури,

- температуру першого і другого перетворювачів перетворюють в електричний опір і в фазорізницьві гармонічні сигнали напруги,

- фазорізницьві гармонічні сигнали перетворюють в часовий інтервал, який дискретизують, квантують і перетворюють в цифрове значення,

- з частотою гармонічного сигналу вимірюють і реєструють різницю температури перетворювачів на інтервалі часу існування процесу зміни температури,

- створюють потік цифрової інформації про різницю температури перетворювачів на інтервалі часу теплового перехідного процесу з періодом фазорізницьвого гармонічного сигналу,

- по потоку цифрової інформації оцінюють величину параметрів термодинамічного процесу, які характеризують його інтенсивність, швидкість і коливальний характер,

- по величині параметрів термодинамічного процесу визначають величину концентрації речовини.

Комплекс дій, якими відрізняється пропонований спосіб від прототипу дозволяє вирішити зада-

чу - підвищити розрізняльну здатність і досягти високої чутливості і точності способу вимірювання концентрації речовини.

Нові властивості запропонованого способу, які використовуються для вимірювання всіх основних параметрів динаміки теплообміну між малоінерційним вимірювальним перетворювачем температури і досліджуваною речовиною, полягають в застосуванні для візуалізації і реєстрації перехідного процесу нагрівання вимірювального перетворювача нового способу перетворення температури провідників електричного струму, а точніше опору провідників в фазорізницьвий сигнал. Частота вимірювання температури відповідно до цього способу дорівнює частоті гармонічного сигналу збудження, що створює фазорізницьві сигнали в вимірювальному перетворювачі опору. Практично період частоти збудження набагато менший ніж час теплового перехідного процесу і тому можлива його візуалізація і вимірювання всіх суттєвих параметрів.

На фіг 1 показані сигналограми теплового перехідного процесу при взаємодії сенсора перетворювача температури у вигляді тонкого мідного проводу з повітрям (фіг 1,а) і рідиною (фіг 1,б).

На фіг 2 показані характерні точки параметрів термодинамічного процесу.

З фіг 1 видно, що перехідний процес має дифузійний характер у відповідності до рівняння (2) тільки при взаємодії з повітрям. Перехідний процес взаємодії з рідиною є коливальним, і отже він описується рівнянням другого порядку

$$T_e(t) = T(t) + \frac{mC}{\alpha S} \cdot \frac{dT(t)}{dt} + L_T \frac{d^2T(t)}{dt^2} \quad (3)$$

де  $L_T$  - коефіцієнт, що відповідає за коливальний характер процесу. Це дає змогу збільшити кількість параметрів процесу теплової взаємодії, що використовується для оцінки концентрації від одного ( $\alpha$ ), як в способі прототипу, до трьох:  $\alpha$ ,  $C$ ,  $L_T$ . При цьому вода розглядається як зразкова речовина. Отже суттєвими ознаками способу є створення динамічного процесу взаємодії і використання фазорізницьвого цифрового реєстратора процесу. Порівняльний аналіз запропонованого рішення з прототипом показує, що завдяки наявності операцій нагрівання перетворювачів струмом ступінчастої форми, перетворення різниці температури в фазорізницьвий гармонічний сигнал реєстрації параметрів теплового перехідного процесу і оцінки концентрації по параметрам інтенсивності, швидкості і колиальному характеру цього процесу.

При вивченні інших рішень в техніці аналізу способів вимірювання концентрації речовини не було виявлено спільності нових суттєвих ознак.

Сутність запропонованого способу вимірювання концентрації речовини полягає в тому, що він оснований на тепловій взаємодії термочутливого елемента з речовиною, залежності теплопровідності і теплоємності речовини від її концентрації, і в зв'язку з цим, залежності від неї температури, часу і характеру нагріву термочутливого елемента, контактуючого з речовиною, стороннім джерелом енергії. А вимірювання концентрації речовини здійснюється шляхом реалізації такої послідовнос-

ті фізичних процесів

- В зразковій речовині розміщують перший малоінерційний твердотільний вимірювальний перетворювач температури з термозалежними електричним опором (наприклад, мідний провідник)

- Другий аналогічний вимірювальний перетворювач (з однаковими характеристиками з першим) розміщують в досліджуваній речовині

- Одночасно нагрівають перший і другий вимірювальні перетворювачі електричним струмом ступінчастої форми до стаціонарної температури (до такої, коли температура нагріву перетворювача перестав змінюватись при незмінному електричному струмі його нагрівання) Тобто здійснюють стаціонарний процес нагрівання провідників з термозалежним опором На величину температури і часові параметри теплового перехідного процесу впливає зовнішнє середовище, тобто речовина, в якій розміщений провідник, і її концентрація Тому теплові перехідні процеси нагрівання термочутливих перетворювачів в зразковій і досліджуваній речовинах будуть різними

- В зразковій і досліджуваній речовинах створюються стаціонарні теплові конвекційні процеси теплової взаємодії вимірювальних перетворювачів температури з речовиною Під дією концентрації речовини на тепловий процес в провіднику по різному відбувається зміна параметрів інтенсивності процесу конвекції тепла в зразковій і досліджуваній речовинах в результаті перерозподілу теплової енергії між провідником і середовищем (речовиною) Зміну параметрів процесу конвекції визначають методом вимірювання і реєстрації температури провідника (вимірювального перетворювача), який використовується як терморезистивний перетворювач температури в електричний опір

- Цифрове вимірювання температури здійснюється методом перетворення опору вимірювальних перетворювачів в фазорізнцевий гармонічний сигнал напруги Таке перетворення здійснюється в результаті підключення термочутливого елемента (провідника) до резонансної електромагнітної системи магнетик-провідник, яка збуджується гармонічним електричним струмом низької частоти

- Температурний перехідний процес в термочутливому елементі вимірюють і реєструють, вимірюючи інтервал часу як інформаційний параметр фазорізнцевого гармонічного сигналу

- Цей інтервал часу дискретизують, квантують і перетворюють в цифрове значення

- З частотою фазорізнцевого гармонічного сигналу створюють потік цифрової інформації про різницю температури першого і другого вимірювальних перетворювачів (в зразковій і досліджуваній речовинах) на інтервалі часу зміни їх температури від початку нагріву електричним струмом ступінчастої форми до встановлення стаціонарної температури

- З частотою фазорізнцевого гармонічного сигналу реєструють процес зміни різниці температур першого і другого вимірювальних перетворювачів

- По потоку цифрової інформації оцінюють величину параметрів термодинамічного процесу, які характеризують його інтенсивність, швидкість і коливальний характер

- По величині параметрів термодинамічного процесу визначають величину концентрації речовини

В запропонованому способі для збільшення чутливості вимірювання використовується методика урахування множити параметрів термодинамічного процесу, чутливого до зміни концентрації речовини Відповідно до цієї методики знаходимо цифрові значення параметрів відмічених на координатних осях кривих 1 і 2 фіг 2, на якій показані сигналами зміни температури першого і другого вимірювальних перетворювачів під час їх нагрівання Сигналограма 1 відноситься до температури теплового перехідного процесу в зразковій речовині, а сигналаграма 2 відноситься до теплового перехідного процесу в досліджуваній речовині, яка містить 1% цукру в воді По сигналаграмам 1 і 2 обраховують значення коефіцієнтів  $\alpha$ ,  $C$ ,  $L_T$  і по ним оцінюють величину концентрації речовини Параметр  $\alpha$ , приймає значення  $\alpha_1=a$ ,  $\alpha_2=a'$ , параметр  $C$  має значення  $C_1=b$ ,  $C_2=b'$ , параметр  $L_T$  виражається тривалістю відрізка часу  $t$   $L_{T1}=d-c$ ,  $L_{T2}=d'-c'$  Довжина відрізка на осі ординат  $N$  виражається в одиницях дискретизації (цифровій чутливості) температури, а довжина відрізків на осі абсцис  $t$  вимірюється в одиницях дискретизації часу, що дорівнює періоду  $T$  вимірювання температури

Концентрацію вважаємо пропорційною цифровим значенням параметрів  $\alpha$ ,  $C$  і  $L_T$

$$\alpha = (a'-a)(b'-b)[(d'-c')+(d-c)] \quad (4)$$

а чутливість способу

$$\Delta = \frac{K}{a} = \frac{K}{(a'-a)(b'-b)[(d'-c')-(d-c)]} \quad (5)$$

Аналіз виразу (5) показує, що величина  $\Delta$  завжди менше при урахуванні кількох параметрів ( $a'-a$ ), ( $b'-b$ ),  $[(d'-c')-(d-c)]$  ніж одного ( $a'-a$ ), ( $b'-b$ ) або  $[(d'-c')-(d-c)]$  Таким чином чутливість способу з урахуванням множини параметрів термодинамічного процесу завжди вище, ніж однопараметричний процес

Реалізацію способу розглянемо на прикладі вимірювання концентрації цукру в воді Наливаємо в дві однакові ємності воду В одній ємності розчиняємо цукор В обох ємностях розміщуємо термочутливі елементи у вигляді мідного провідника, які підключаємо до фазорізнцевих перетворювачів і до генератора електричного струму Фазорізнцеві перетворювачі збуджуємо гармонічним сигналом струму частотою 50 Гц В термочутливі елементи (мідні провідники) від генератора струму подається електричний струм ступінчастої форми, в результаті чого мідні провідники нагріваються і опір їх зростає, що викликає зміну зсуву фази струму гармонічного сигналу відносно е.р.с збудження В результаті теплової конвекції середовища, в якому розміщені термочутливі елементи (в зразковій речовині - воді і в досліджуваній - розчині цукру), температура і час їх нагріву будуть різними, відповідно і зсув фаз між струмом гармонічного сигналу і сигналом е.р.с збудження будуть різними Зсув фаз між струмом і е.р.с (або між струмом в термочутливих елементах в зразковій і досліджуваній речовинах) перетворюється в інтервал часу, який дискретизується, квантується і

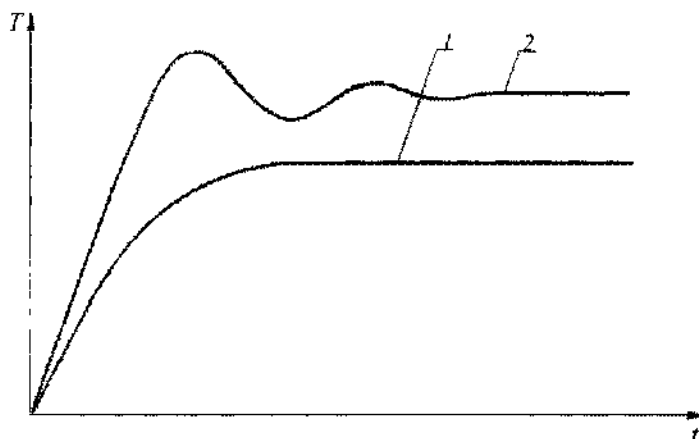
перетворюється в цифрове значення. Цифрові значення температури нагріву термочутливих елементів з частотою гармонічного сигналу збудження передаються в ПЕОМ (або мікропроцесор), створюючи потік цифрової інформації про температурний перехідний процес, де вони реєструються з дискретністю періоду гармонічного сигналу збудження і перетворюються в параметри інтенсивності, швидкості і характеру термодинамічного процесу двох термочутливих елементів. По параметрам цього процесу ПЕОМ (або мікропроцесор) проводить обчислення, порівнює їх з базовими, які занесені в пам'ять, і видає результат вимірювання концентрації речовини в процентах.

В порівнянні з відомими запропонований спосіб вимірювання концентрації дозволяє в кілька разів збільшити чутливість за рахунок використання цифрових значень трьох параметрів термодинамічного процесу замість одного - статичного процесу теплової взаємодії сенсора з досліджуваною речовиною. Крім того розширюються функціональні можливості вимірювання концентрації за рахунок придатності методу для вимірювання кон-

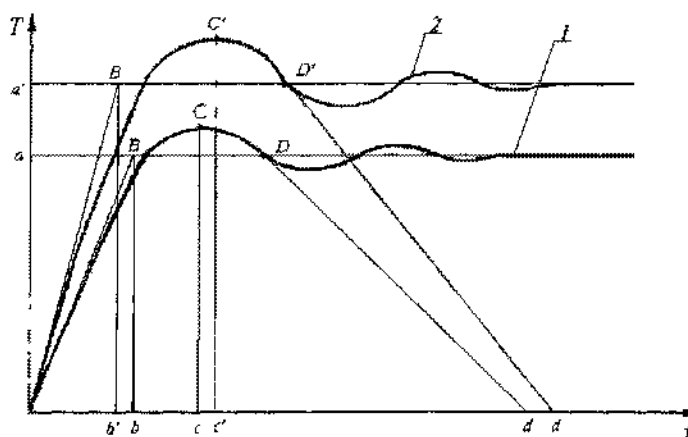
центрації рідин, поряд з концентрацією газів, якими обмежується застосування окремих способів. Твердотільні перетворювачі температури не обов'язково розміщувати в спеціально виготовлених камерах, їх можна розміщувати в промислових резервуарах і вимірювати концентрацію речовини безпосередньо в умовах виробництва.

Спосіб може застосовуватися як для промислових автоматичних вимірювань, так і для лабораторних досліджень.

Відповідно до існуючої теорії управління термодинамічну характеристику взаємодії (фіг 2) розглядають як відгук динамічної системи на дію ступінчастої сили. Така динамічна система має власні коливання, які характеризуються резонансною частотою збудження силою, що має гармонічну форму. Тому є можливість замінити ступінчасту дію гармонічним сигналом, частота якого близька до резонансного. При такому збудженні концентрація речовини може оцінюватися часовою затримкою між гармонічним сигналом збудження та вимірювальним і реєструємим гармонічним сигналом теплового перехідного процесу.



Фиг 1



Фиг 2