

З. Д. Безрук

Національний технічний університет
України НТУУ «КПІ», Київ, Україна
e-mail: avtoeko@faust.net.ua

УДК 543.271.3

РОЗРАХУНКОВА МОДЕЛЬ ВИЗНАЧЕННЯ ШВИДКОЇ ГАЗОАНАЛІТИЧНОГО КОМПЛЕКСУ

Ключові слова: швидкодія, транспортне запізнення, газоаналітичний комплекс.

Анотація. Розглянуті питання підвищення швидкодії газоаналітичного вимірювального комплексу. Розроблена математична модель часу проходження газової проби по блокам і вузлам газової схеми. Визначені елементи схеми, які знижують швидкодію. Надані рекомендації з оптимізації схеми побудови газоаналітичного комплексу. При експериментальних дослідженнях виявилось, що теоретичний розрахунковий час транспортного запізнювання, завжди на 15-20 відсотків менше від дійсного реального часу запізнювання.

Вступ

Перехід від розрахункових методик визначення рівня забруднення димовими газами промислових і енергетичних підприємств до прямих інструментальних вимірювань концентрації токсичних і парникових газів виявив характерну проблему роботи газоаналітичних комплексів – низьку швидкодію.

Постановка задачі

Низька швидкодія газоаналітичних комплексів викликана значним часом транспортного запізнення при проходженні газової проби від точки відбору димового (технологічного газу) до газоаналізаторів (ГА). Саме вимоги до оптимального функціонування ГА: стабілізація тиску і витрат димового газу, очищення і фільтрація проби, видалення вологи і т.д. призводять до необхідності встановлення різноманітних елементів пробовідбору і пробопідготовки на лінії транспортування газової проби [1 – 3]. На вказаних елементах і блоках пробовідбору відбувається втрата часу і відповідно зменшення швидкодії комплексів в цілому. Виникає потреба в теоретичних дослідженнях в розробці методик визначення часу транспортного запізнення і рекомендації по його зменшенню.

Математична модель транспортного запізнювання

Математична модель часу транспортного запізнювання газоаналітичного комплексу, від моменту відбору проби до надходження на ГА, розробляється для типової схеми газоаналітичного комплексу (рис.1) [2, 3]. Теоретичний час запізнювання на кожній ділянці проходження газової проби визначається за формулою:

$$t = \frac{W_i}{Q_i}, \quad (1)$$

де W_i – об'єм i -ї ділянки газового тракту;
 Q_i – витрати на i -й ділянці газового тракту.
Сумарний теоретичний час запізнювання:

$$\Sigma_t = \Sigma_{t_1} + \Sigma_{t_2}, \quad (2)$$

де Σ_{t_1} – теоретичний час запізнювання на прямих ділянках;
 Σ_{t_2} – теоретичний час запізнювання на локальних (місцевих) змінах конфігурації газопровідної трубки.

При експериментальних дослідженнях виявилось, що теоретичний розрахунковий час транспортного запізнювання завжди на 15-20 відсотків менше від дійсного реального часу запізнювання. Було встановлено, що рух реальних газів газопровідними трубками до ГА супроводжується падінням тиску на відповідних ділянках транспортування газової проби. Розрізняють падіння тиску, обумовлені тертям (які залежать від довжини газопровідних трубок, діаметра, швидкості прокачування проби газу і в'язкості), а також падіння тиску на локальних (місцевих) змінах конфігурації газопровідної трубки, обумовлені вигинами трубопроводу, зміною діаметра і т.п. Конфігурація прокладки газопровідної трубки залежить від конкретних виробничих умов: точки відбору проби димового газу, місця встановлення ГА, умов експлуатації.

$$\Delta P = \Delta P_{\delta} + \Delta P_m. \quad (3)$$

Загальні втрати тиску ΔP визначаються, як сума витрат по довжині (ΔP_d) на змінах конфігурації газопровідної трубки (ΔP_m).

Одним з основних факторів, які характеризують втрату тиску, є коефіцієнт опору тертя, значення якого суттєво впливають на швидкість руху проби, а також на час транспортного запізнювання.

Теоретична швидкість руху газу в газопровідній трубці без опору

$$V_m = \sqrt{2gH} \quad (4)$$

де H – пневматичний напір;

g – прискорення вільного руху (падіння);

Теоретичну швидкість руху газу можна визначити по формулі

$$V_m = \frac{Q}{S} \quad (5)$$

де Q – відомі витрати проби газу;

S – площа поперечного перерізу газопровідної трубки.

Швидкість і відповідно час проходження газової проби через присутність локальних (місцевих) змін конфігурацій газопровідної трубки буде менше:

$$V_d = \frac{V_m}{\sqrt{1+\lambda}} \sqrt{2gH} \quad (6)$$

де λ – коефіцієнт опору тертя газової проби.

Підставивши рівняння (4) в рівняння (6), маємо

$$V_d = \frac{1}{\sqrt{1+\lambda}} V_m \quad (7)$$

Тоді з формули (6) після перетворень можна отримати зв'язок між дійсним і теоретичним часом транспортного запізнювання:

$$t_{li} = \sqrt{1+\lambda} \cdot t_{2i} \quad (8)$$

Швидкодія – один з самих важливих чинників автоматичного контролю та складу димових газоаналітичних комплексів. Час транспортного запізнювання від пробовідбірника ПВ до газоаналізаторів CO, CH, NO визначається як сума часів, розрахованих по кожній ділянці і елемента пробовідбірки газоаналітичного комплексу [3, 4]. Необхідні для розрахунку характеристики основних вузлів і ділянок схеми наведені в табл. 1.

З рівняння (8) видно що, t_2 суттєво залежить від коефіцієнта опору тертя газів при проходженні газової проби, як прямолінійними ділянками, так і при локальній (місцевій) зміні конфігурації газопровідної трубки. Коефіцієнт опору береться виходячи з режиму руху газу, що досліджується [5 – 6]. Режим проходження газу (ламінальний або турбулентний) визначається величиною числа Рейнольдса

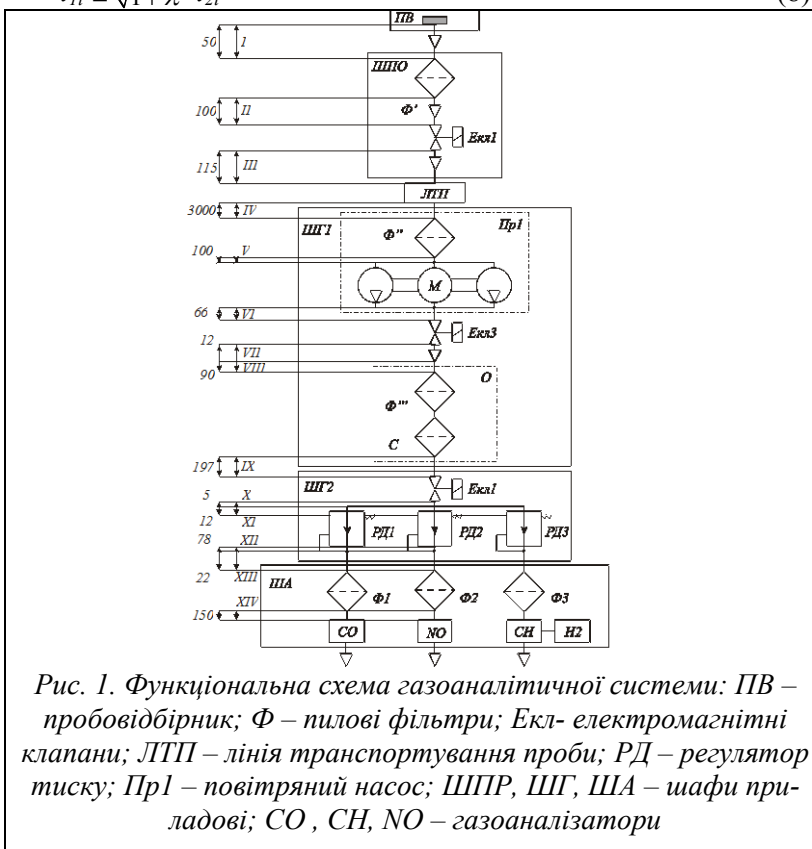


Рис. 1. Функціональна схема газоаналітичної системи: ПВ – пробовідбірник; Ф – тилві фільтри; Екв- електромагнітні клапани; ЛТП – лінія транспортування проби; РД – регулятор тиску; Пр1 – повітряний насос; ШПР, ШГ, ША – шафи приладові; CO, CH, NO – газоаналізатори

$$Re = \frac{v \cdot d}{\gamma}, \quad (9)$$

де: d – діаметр трубопроводу;
 γ – коефіцієнт кінематичної в'язкості газу;
 v – середня швидкість газу в трубопроводі.

Таблиця 1. Параметри основних вузлів газоаналітичного комплексу

Ділянка	Параметри					
	L , см	d , см	Q , л/хв	W , см ³	t_1 , с	t_2 , с
ПО	203.0	1	20	159	0.477	0.49
I	50.0	0.8	20	25.1	0.075	0.162
Ф	-	-	20	102.2	0.3	0.367
II	100.0	0.8	20	50.3	0.15	0.152
Екл 1	-	-	20	9.2	0.028	0.042
III	115.0	0.8	20	57.5	0.172	0.119
ЛТП	3000.0	0.4	20	376	1.12	1.722
IV	37.0	0.4	20	4.65	0.04	0.04
Ф	-	-	20	5.00	0.015	0.015
V	85.0	0.4	20	10.7	0.032	0.035
Пр 1	-	-	20	55.0	0.16	0.226
VI	66.0	0.4	20	8.3	0.025	0.025
Екл 3	-	-	20	9.2	0.028	0.042
VII	12.0	0.4	20	1.51	0.004	0.004
VIII	90.0	0.4	40	11.3	0.017	0.026
Ф	-	-	40	5	0.015	0.015
C	-	-	40	15.5	0.046	0.065
IX	197.0	0.4	4.5	24.8	0.330	0.053
Екл 1	-	-	4.5	9.2	0.028	0.042
X	5.0	0.4	4.5	0.63	0.008	0.008
XI	12.4	0.4	1.5	1.5	0.06	0.133
РД1, РД2	-	-	1.5	450	18.00	25.000
XII	78.0	0.4	1.5	9.8	0.39	0.526
XIII	22.0	0.4	1.0	2.76	0.165	0.252
Ф1-Ф2	-	-	1.0	22.25	1.33	1.39
XIV	150.0	0.4	1.0	18.8	1.12	1.724

Для типової газовідбірної трубки довжиною 30 метрів та діаметром 40мм, при витратах 20 л/хв, швидкість руху газу визначиться як

$$v = \frac{Q}{S} = \frac{4Q}{\pi d^2} = 2660 \text{ см/с}. \quad (10)$$

Необхідні для розрахунку данні про коефіцієнти кінематичної в'язкості суміші і їх об'ємній місткості в % наведені в табл. 2 [5].

Таблиця 2. Коефіцієнт кінематичної в'язкості газів

Компоненти	Коефіцієнт кінематичної в'язкості γ при тиску 1 кгс/см ² і температурі, °C				Концентрація, об. %
	80	10	20	35	
Водень	143,0	99,0	105,0	110,5	20,5
Оксид вуглецю CO	21,0	14,3	15,2	16,5	10
Двоокис вуглецю CO ₂	12,1	7,6	8,0	8,7	40
Кисень	21,2	14,5	15,4	16,6	20,2

З розрахунків кінематичний коефіцієнт в'язкості для даної суміші газів в лінії транспортування проби $\gamma = 0,187$ см. Підставивши отримані величини в формулу (8), отримаємо $R = 6590$, що відповідає ламінарній текучості газу. Для ламінарного режиму текучості коефіцієнт опору визначається формулою

$$\lambda_1 = \frac{64}{Re}. \tag{11}$$

Цей коефіцієнт враховує втрати по довжині і в'язкість газу при різних температурах. Втрати на місцевих змінах конфігурації газопровідної трубки (повороти з закругленнями і без закруглень, розширення, звуження та ін.) враховуються за допомогою коефіцієнта λ_2 .

Тоді сумарний коефіцієнт опору тертя

$$\lambda = \lambda_1 + \lambda_2. \tag{12}$$

Для прямолінійних відрізків коефіцієнт λ_2 дорівнює нулю.

При визначенні місцевих втрат напору і коефіцієнтів опору тертя можливі декілька випадків:

1) раптове розширення поперечного перерізу труби (рис. 2);

При цьому виникають так звані втрати на удар. Коефіцієнт опору удару у випадку рівномірного розподілу швидкості по перерізу каналу перед його розширенням залежить від відношення площі і числа Рейнольдса.

2) миттєве звуження струменя з площі W до площі w (рис. 3);

$\frac{W}{w}$	0,01	0,10	0,20	0,40	0,60	0,80
λ_2	0,50	0,45	0,40	0,30	0,20	0,10

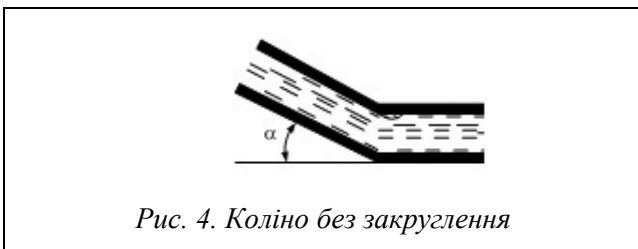
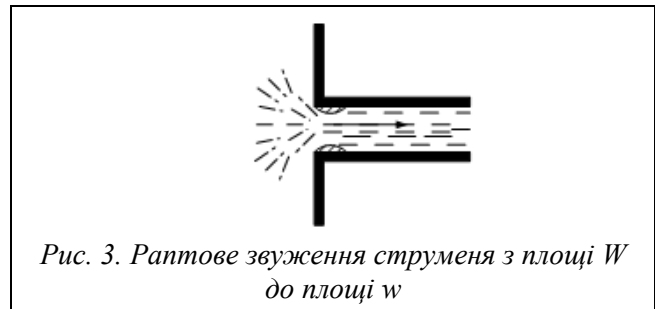
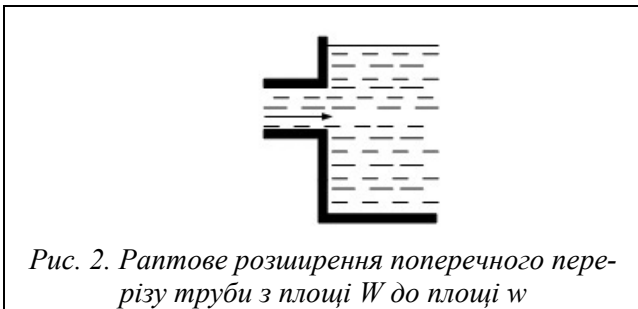
3) коліна і закруглення в трубах (рис. 4):

а) коліно без закруглення (рис. 5);

α°	30	40	50	60	70	80	90
λ_2	0,2	0,3	0,4	0,55	0,7	0,9	1,1

б) коліно з закругленням (рис. 5);

$\frac{r}{R}$	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
λ_2	0,131	0,138	0,158	0,206	0,294	0,440	0,661	0,977	1,408	1,978



Наведені результати можна використовувати і для інших кутів закруглення $\alpha \neq 90^\circ$, помноживши значення λ_2 на відношення $\frac{\alpha}{90}$.

Найбільшими з усіх місцевих втрат для даної системи є втрати на вентилях, фільтрах, регуляторах тиску, колінах з закругленням і без закруглень. Дійсне значення транспортного запізнювання визначається за формулою (8), при цьому необхідно розрахувати для кожного відрізка суміші коефіцієнт опору тертя, а також місцеві коефіцієнти тертя для цілих пристроїв, наприклад для пробовідбірника, спонукача витрат, редуктора [9, 10].

Для визначення коефіцієнта опору прямолінійних відрізків системи використовується формула (11), де число Рейнольдса і коефіцієнт кінематичної в'язкості розраховують відповідно для кожного відрізка. Варто відзначити, що розрахунки в цьому випадку стають складнішими через значні перепади температури. На вході пробовідбірного пристрою температура газової суміші (конвертора) 1500°C , а на виході $80\text{-}100^\circ\text{C}$, причому цей перепад відбувається на довжині 2 м.

Методи теоретичного розрахунку коефіцієнта дуже громіздкі, тому краще використовувати експериментальні дані, що наведені в таблиці 3.

Таблиця 3. Коефіцієнти кінематичної в'язкості газів в залежності від температури

Ділянка	Параметри							
	d, см	S, см ²	T, °C	v, см/с	γ	Re	λ_1	λ_2
ПО	1,0	0,79	1500	425	0,49	86,7	-	0,06
I	0,8	0,50	100	664	0,20	2653	0,025	3,64
Ф	-	-	80	-	0,17	-	-	0,50
II	0,8	0,50	80	664	0,19	2842	0,022	-
Екл 1	-	-	80	-	0,19	-	-	1,20
III	0,8	0,50	80	664	0,19	2842	0,022	-
ЛТП	0,4	0,125	80	2660	0,19	5690	0,011	1,30
IV	0,4	0,125	80	2660	0,19	5690	0,011	-
Ф	-	-	80	-	0,19	5690	-	0,04
V	0,4	0,125	80	2600	0,19	5690	0,011	-
Пр 1	-	-	80	-	0,19	-	-	1,00
VI	0,4	0,125	80	2660	0,19	5690	0,011	-
Екл 3	-	-	80	-	0,19	-	-	1,20
VII	0,4	0,125	80	2660	0,19	5690	0,011	-
VIII	0,4	0,125	80	5550	0,19	5690	0,011	1,30
Ф	-	-	10	-	0,12	-	-	0,011
С	-	-	10	-	0,12	-	-	1,00
IX	0,4	0,125	20	625	0,13	1951,6	0,033	-
Екл 1	-	-	20	-	0,13	-	-	1,20
X	0,4	0,125	20	625	0,13	1951,6	0,033	-
XI	0,4	0,125	20	25	0,13	78,1	0,820	3,08
РД1, РД2	-	-	20	-	0,13	-	-	1,00
XII	0,4	0,125	20	25	0,13	78,1	0,820	-
XIII	0,4	0,125	35	16,7	0,14	47,8	1,33	-
Ф1-Ф2	-	-	35	-	0,14	-	-	0,011
XIV	0,4	0,125	35	16,7	0,14	47,8	1,33	-

Знаючи температуру газової суміші на ділянках, визначаємо на кожному з них коефіцієнт кінематичної в'язкості суміші. Результати зводимо в таблицю 3. Далі розраховуємо дійсний час транспортного запізнювання за формулою (8), отримані дані зводимо в таблицю 1.

Висновки

Запропонована розрахункова методика визначення транспортного запізнювання газової проби в газоаналітичних комплексах, з урахуванням складу газової суміші, елементів пробовідбору і прободготовки.

При порівнянні теоретичного і дійсного часу транспортного запізнювання газоаналітичного комплексу ($t_1=32,675$ с; $t_2=24,14$ с.) встановлено, що більша частина часу втрачається на регуляторах абсолютного тиску перед подачею на газоаналізатори $t=25$ с і безпосередньо на інфрачервоних ГА $t=18$ с. Таким чином, зменшити час транспортного запізнювання газоаналітичних комплексів можна такими шляхами:

- Використанням запропонованої розрахункової методики для теоретичного розрахунку часу транспортного запізнення і визначення елементів схеми на яких запізнення найбільше;
- Проведенням експериментальних досліджень для виявлення нових методів стабілізації тиску і витрат газової проби.
- Оптимальним вибором швидкодіючих методів газового аналізу при побудові газоаналітичних комплексів.

Література

1. Вартанов, А. З. Методы и приборы контроля окружающей среды и экологический мониторинг. / А. З. Вартанов, А. Д. Рубан, В. Л. Шкурятник. – М.: Горная книга, 2009. – 640 с.
2. Безрук, З. Д. Газоаналітичний технологічний комплекс з мікропроцесорною системою / З. Д. Безрук, О. А. Дашковський, В. П. Бородавка. – М.: Бюл.З, 2004.
3. Мовчан, Н. М. Инструментальный контроль выбросов в атмосферу киевского мусоросжигательного завода “Энергия” / З. Д. Безрук, А.А. Дашковский, В.Ф. Примиский. – Харьков: Экологический альянс, 2005. – 250 с.
4. Безрук, З. Д. Экспериментальные исследования выбросов мусоросжигательного производства / З. Д. Безрук, В. А. Порев, В. Ф. Примиский. – К.: НТУУ «КПИ», 2005. – 153 с.
5. Голубев, И. Ф. Вязкость газов и газовых смесей / И. Ф. Голубев. – М.: Физматлит, 1959. – 377с.
6. Порев, В. А. Вимірювальний газоаналітичний комплекс паливно-мастильних матеріалів / В. А. Порев, З.Д. Безрук, В. П. Приміський. – К.: НТУУ «КПИ», 2006. – 69 с.
7. Безрук, З. Д. Системи інструментального екологічного моніторингу. / З. Д. Безрук. – К.: НТУУ «КПИ», 2008. – 179 с.
8. Безрук, З. Д. Еколого-технологічний моніторинг переробки відходів / З. Д. Безрук, В. П. Приміський. – Одесса: Современные информационные и электронные технологии, 2004. – 100 с.
9. Мовчан, Н. М. Экспериментальные газоаналитические исследования выбросов мусоросжигательного завода / Н. М. Мовчан, З.Д. Безрук, А. А. Дашковский, В.А. Порев. – АР Крим, Алушта: Екологічна безпека: проблеми і шляхи вирішення, 2005. – 208 с.
10. Визнюк, А. А. Створення систем технолого-екологічного моніторингу забруднення атмосфери / А. А. Визнюк, З. Д. Безрук. – К.: Екологія довкілля та безпека життєдіяльності, 2004. – 71 с.

Поступила в редакцію 01.10.13