

ДОДАТОК 6.G (інформаційний)

ОПИС ВАЛІДАЦІЙНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

6.G.1 Огляд валідаційних досліджень

6.G.1.1 Загальні положення

Лабораторні валідаційні дослідження були проведені компанією Muller BBM за сприяння компанії E.ON, ABB, Hoentzsch, Sick в аеродинамічних трубах Берлінського технічного університету, в Інституті авіації та космонавтики (TUB). Вентилятор аеродинамічної труби був орендований TUB, аеродинамічна труба була виготовлена та поставлена компанією Muller-BBM (MBBM). Подальші випробування були проведені в аеродинамічній трубі з підігрівом у TUB (див. [26]).

Промислові випробування проводили в місцях, описаних у 6.G.1.2 і 6.G.1.3.

6.G.1.2 Установка для спалювання побутових відходів в Данії

Сміттеспалювальна установка працювала з трьома лініями спалювання, що живили загальну димову трубу внутрішнім діаметром 2,8 м. Димовий газ зазвичай має температуру 130 °C за 10 % об'ємної частки сухого O₂ і містить близько 20 % об'ємної частки водяної пари. Під час випробувань сумарна швидкість становила ~ 20 м/с. Рівень завихрення становив менше 15 °.

Були доступні дві вимірювальні платформи на відстані близько $4d_s$ і $20d_s$, де d_s – діаметр димової труби від вхідного отвору. Чотири групи дослідників провели 20 вимірювань швидкості в точках, використовуючи трубки Піто L-, S-типу, сферичні (3D-типу) та лопатевий анемометр. Були також використані два методи визначення: метод визначення часу проходження з використанням речовини-свідка і метод розведення з використанням газів-свідків (закису азоту та метану).

Вимірювання за допомогою трубок Піто на нижньому рівні показали дуже неоднорідні профілі швидкості порівняно з дуже однорідними профілями, отриманими на верхньому рівні, які наближалися до повністю сформованих умов. Незважаючи на це, в обох випадках були отримані репрезентативні сумарні значення об'ємної швидкості.

Було чотири окремі лінії спалювання змішаних відходів (переважно побутових), кожна з яких була обладнана системами очищення від оксидів азоту (селективне некаталітичне відновлення, СНКВ), очищення від твердих частинок (рукавні фільтри) та індивідуальними системами безперервного моніторингу викидів (БМВ). Під час випробувань працювали лише три лінії.

6.G.1.3 Вугільна ТЕС у Німеччині

Валідаційне дослідження було проведено на електростанції потужністю 700 МВт, що працює на вугіллі, в Німеччині. Потік з котла розподіляється між двома технологічними лініями очищення, кожна з яких має електрофільтри, системи видалення оксидів азоту NO_x (селективне каталітичне відновлення, СКВ) та систему мокрої десульфуризації димових газів (ДДГ). Гази подають в загальну димову трубу з внутрішнім діаметром 7 м. Температура димового газу зазвичай становить 120°C , об'ємна частка сухого O_2 становить 6 %, а об'ємної пари – близько 12 %. Під час випробувань сумарна швидкість коливалася від 24 до 31 м/с, а ступінь завихрення потоку становила менше 15° .

Одна вимірювальна платформа була доступна на відстані близько 6,5 м від входу в димову трубу на рівні 52,3 м. Чотири команди випробувачів виконали 20 швидкісних проходів по точках, використовуючи парні системи трубок Піто L-, S-типу, сферичних (3D) і трубок Піто 2D-типу. Трубки Піто L-типу були з'єднані між собою та вставлені в один отвір. На цій ТЕС не було можливості використовувати методи визначення речовини-свідка через труднощі з отриманням дозволу на використання радіоактивної речовини і низької якості змішування, досягнутого за використання методів розведення в потоці.

Вимірювання за допомогою трубок Піто показали неоднорідні профілі швидкості. Незважаючи на це, були отримані репрезентативні сумарні значення об'ємної швидкості.

Трубки Піто L-, S- та 3D-типу показали порівнянні результати середньої швидкості, при цьому результат для трубки Піто 3D-типу був приблизно на 1 % нижчим, ніж для L-типу, і демонстрував велику різницю між двома системами. Трубки Піто L-типу показали найменшу різницю між системами, як і слід було

очікувати, оскільки номінально вимірювання проводили в одній точці. Ці результати узгоджуються з витратою ТЕС, обчисленою виходячи з вироблення електроенергії і ККД ТЕС.

6.G.2 Результати лабораторної валідації

Ефективність ручних методів, оцінених під час програми лабораторних випробувань, підсумовано в таблиці 6.G.1, яка представляє лінійну регресію цих методів, і в таблиці 6.G.2, яка підсумовує оцінку невизначеності методів за результатами лабораторного дослідження. Для трубок Піто 3D-типу (ES і AP) наведено два результати, які стосуються двох різних калібрувальних коефіцієнтів, наданих двома різними постачальниками та різними підходами. Більш детально це описано у звіті про лабораторні випробування.

У таблиці 6.G.3 наведено дані про відсутність відповідності, визначені в результаті лабораторних досліджень регресії відповідно до процедури, наведеної в EN 15267-3 [11]. Тут невідповідність кількісно визначають як найбільше (абсолютне) відхилення від визначеної лінії регресії будь-якої окремої точки даних вимірювань. Для ілюстрації, невідповідність також порівнювали з критерієм невідповідності, наведеним в стандарті EN 15267-3 [11], що становить 3 % від діапазону випробувань.

Таблиця 6.G.1 – Дані лінійної регресії для ручних методів на основі даних лабораторних випробувань

Трубка Піто	Засіб	Нахил	Затримка, м/с
3D (ES)	Перепад тиску по 3 осях	0,996	-0,222
		1,002	-0,652
3D (AP)	Перепад тиску по 3 осях	1,012	-0,229
		1,051	-0,716
S-тип	Перепад тиску	0,830	-0,286
		0,833	-0,205
L-тип	Перепад тиску	1,025	-0,500
		1,008	-0,160

Таблиця 6.G.2 – Аналізування невизначеності відповідно до ISO 20988 для ручних методів лабораторного оцінювання

Засіб	Похибка	Критерії похибки	Невизначеність	Розширена невизначеність	Коефіцієнт охоплення
	u_B , м/с	м/с	U , м/с	$U_{0,95}$, м/с	k
Трубка Піто 3D -типу (ES)	0,0002	0,246	0,252	0,504	2
Трубка Піто 3D -типу (AP)	0,006	0,247	0,261	0,522	2
—Трубка Піто S-типу;	0,005	0,238	0,108	0,216	2
Трубка Піто L-типу	0,100	0,278	0,503	1,006	2

Примітка. Компанія MBVM запропонувала можливе пояснення щодо вищої похибки та невизначеності, що спостерігають для трубки Піто L-типу, а саме, що таке підвищення може бути викликане використанням різних електронних пристроїв для вимірювання тиску під час виконання програми випробувань. При розробці стандарту EN ISO 16911-1 була врахована важливість використання відстежуваних, відкаліброваних пристроїв для вимірювання тиску з відповідними діапазонами вимірювань.

Таблиця 6.G.3 – Невідповідність, визначена за даними лабораторних випробувань для ручних методів

Засіб	Невідповідність випробувального діапазону (25 м/с), %	Критерій (EN 15267-3 [11]), %
L ₁	0,78	3
L ₂	0,97	3
3D ₁ (ES)	1,14	3
3D ₂ (ES)	0,91	3
3D ₁ (AP)	1,12	3
3D ₂ (AP)	0,87	3
S ₁	1,73	3
S ₂	2,57	3

6.G.3 Результати промислових валідаційних досліджень

6.G.3.1 Повторюваність і невизначеність ручних методів в ході першого промислового валідаційного дослідження

Для того, щоб оцінити повторюваність ручних методів у першому промисловому валідаційному дослідженні, парні набори даних для трубок Піто 3D- і S-типу були оцінені відповідно до процедури, наведеної в стандарті CEN/TS 14793 [10], який передбачає метод визначення зведеного стандартного відхилення парних результатів (для трубок Піто L-типу та лопатевих анемометрів парні дані не були доступні). Це було зроблено шляхом визначення стандартного відхилення кожної пари вимірювань, а потім об'єднання їх як дисперсій (тобто середньої суми квадратів). Це оцінювання враховує вплив будь-яких систематичних відмінностей між методами.

Для того, щоб оцінити загальне стандартне відхилення ручних методів, було визначено стандартне відхилення кожного набору збіжних результатів для трубок Піто 3D, S-типу, лопатевого анемометру і трубки Піто L-типу, а також зведене стандартне відхилення для всіх цих наборів вимірювань, знову ж таки, відповідно до підходу, наведеного в CEN/TS 14793 [10]. Крім того, було визначено зведене

стандартне відхилення для парних трубок Піто 3D- та S-типу. Результати цих випробувань наведені в таблиці 6.G.4.

Таблиця 6.G.4 – Зведені стандартні відхилення ручних методів

Всі методи		Всі методи за використання трубок Піто	
Середнє значення	19,31 м/с	Середнє значення	19,35 м/с
Зведене стандартне відхилення	0,51 м/с	Зведене стандартне відхилення	0,50 м/с
k	2,00	k	2,00
$U_{95\%}$	1,03 м/с	$U_{95\%}$	1,00 м/с
Коефіцієнт варіації	2,66 %	Коефіцієнт варіації	2,57 %
$U_{95\%,rel}$	5,33 %	$U_{95\%,rel}$	5,15 %
Парна трубка Піто S-типу		Парні трубки Піто 3D-типу	
Середнє значення	19,70 м/с	Середнє значення	18,99 м/с
Зведене стандартне відхилення	0,45 м/с	Зведене стандартне відхилення	0,38 м/с
k	2,00	k	2,00
$U_{95\%}$	0,90 м/с	$U_{95\%}$	0,75 м/с
Коефіцієнт варіації	2,28 %	Коефіцієнт варіації	1,98 %
$U_{95\%,rel}$	4,57 %	$U_{95\%,rel}$	3,97 %

Стандартні відхилення містять як випадкові, так і систематичні відхилення. Вимірювання також проводили в різних місцях відбирання проб (на висоті 60 м і 20 м), тому це аналізування також включає будь-яку варіабельність, спричинену різними конфігураціями відбирання проб. Тому слід проявляти обережність при інтерпретації цих результатів.

Також було обчислене зведене стандартне відхилення для вимірювань, проведених за допомогою трубок Піто L-типу та ручного лопатевого анемометра (таблиця 6.G.5). У цьому аналізуванні були використані всі 18 парних періодів вимірювань, проведених за допомогою цих двох методів.

Таблиця 6.G.5 – Зведене стандартне відхилення для трубок Піто L-типу та лопатевого анемометра

Зведене стандартне відхилення для пари трубки Піто L-типу та лопатевого анемометра	
Середнє значення	19,50 м/с
Зведене стандартне відхилення	0,22 м/с
k	2,00
$U_{95\%}$	0,43 м/с
Коефіцієнт варіації	1,10 %
$U_{95\%,rel}$	2,21 %

Невизначеність ручних методів оцінювали за допомогою методів, визначених у стандарті ISO 20988. Оскільки передбачається, що будь-який з ручних підходів може бути використаний для калібрування методів з використанням АВС, в цьому аналізованні набір ручних методів розглядають як один метод. Таким чином, визначають невизначеність сукупності методів. Результати можуть бути інтерпретовані як невизначеність для будь-якого з ручних методів. Набір паралельних вимірювань можна розглядати як план експерименту, що складається з паралельних вимірювань з ідентичними вимірювальними системами, визначений в ISO 20988 як план експерименту А8. «Ідентичний» тут означає «відповідний вимогам стандарту EN ISO 16911-1». Це передбачає, що невизначеності в різних варіантах застосування методу є подібними (припущення полягає в тому, що всі результати, отримані за допомогою методів, є вибірками з загальної сукупності результатів, що репрезентують «метод» в цілому, відповідно до нормального розподілу ймовірностей).

У першому оцінюванні були оцінені результати шести ручних методів: двох трубок Піто 3D-типу, двох трубок Піто S-типу, трубки Піто L-типу і лопатевого анемометра. При цьому розглядали методи, які вважають порівнянними реалізаціями ручного методу, що забезпечують вимірювання точкових швидкостей.

Аналізування за стандартом ISO 20988 дав наступні результати. Стандартна невизначеність результату вимірювання за застосування ручних методів вимірювання витрати в діапазоні від 17,8 м/с до 21,2 м/с становить $u(y) = 0,49$ м/с. Розширений на 95 % результат вимірювання u з використанням ручного методу

вимірювання витрати в діапазоні від 17,8 м/с до 21,2 м/с становить $U_{0,95}(y) = 0,98$ м/с.

Очікується, що буде охоплений 95 % довірчий інтервал $[y_R - U_{0,95}(y), y_R + U_{0,95}(y)] = 95$ % виміряних точок. Було виявлено, що він охоплює $P = 97,5$ % з оцінених 62 результатів вимірювань $y(k, j)$. Отже, розширену невизначеність $U_{0,95}(y) = 0,98$ м/с вважають розумною мірою невизначеності.

Таким чином, встановлені невизначеності застосовні до вимірювання середнього потоку для повітроводів у м/с, що формують за допомогою сітки вибіркового точкового вимірювань потоку.

Аналогічну оцінку невизначеності було проведено для всіх результатів періодичних методів вимірювання, наведених у таблиці 6.G.6, тобто включно з результатами методів з використанням речовини-свідка. Ці оцінювання були проведені з використанням підходу до оцінювання за стандартом ISO 20988, описаного вище. У таблиці 6.G.6 представлено короткий виклад набору оцінювань невизначеності за стандартом ISO 20988.

Таблиця 6.G.6 – Оцінювання невизначеності ручних методів вимірювання витрати потоку

Стислий виклад результатів аналізу невизначеності		
Ручні методи (Трубки Піто 3D-, L-, S-типу, лопатевий анемометр)		
Похибка	u_B	0,32 м/с
Стандартна невизначеність	$u(j)$	0,49 м/с
Розширена невизначеність	$U_{0,95}$	0,98 м/с
Всі періодичні методи (Трубки Піто 3D-, L-, S-типу, лопатевий анемометр, методи з використанням речовини-свідка)		
Похибка	u_B	0,39 м/с
Стандартна невизначеність	$u(j)$	0,52 м/с
Розширена невизначеність	$U_{0,95}$	1,08 м/с
Способи вимірювання перепаду тиску (Трубки Піто 3D-, L-, S-типу)		
Похибка	u_B	0,35 м/с
Стандартна невизначеність	$u(j)$	0,50 м/с
Розширена невизначеність	$U_{0,95}$	1,00 м/с

6.G.3.2 Повторюваність і невизначеність ручних методів в ході другого промислового валідаційного дослідження.

Під час другого промислового валідаційного дослідження було проведено кілька періодів вимірювань, і тому було неможливо сформувати сукупну статистику ефективності для всіх застосованих методів. Однак для кожного використовуваного типу трубок Піто були проведені парні серії вимірювань. Крім того, під час другого валідаційного дослідження була використана трубка Піто 2D-типу, яка не була доступна під час першого дослідження.

Парні дані кожного методу Піто були проаналізовані за тим самим методом, що й для першого промислового валідаційного дослідження, щоб отримати об'єднані стандартні відхилення для методів, наведені в таблиці 6.G.7. Як можна бачити, трубки Піто L-типу забезпечують дуже хороші показники повторюваності. Оскільки ці трубки Піто були механічно з'єднані між собою, на це аналізування невизначеності не впливають відмінності, спричинені будь-якою неоднорідністю профілю потоку або іншими параметрами (наприклад, густиною газу).

Варіабельність, Var_f , для парних методів була визначена відповідно до процедур, наведених для R_f в EN 15267-3 [11]. Ці дані представлені в таблиці 6.G.8. Зверніть увагу, що значення Var_f визначене на основі парних даних з використанням обчислень для забезпечення відтворюваності, як визначено в EN 15267-3 [11]. Однак, оскільки валідаційне дослідження не є випробуванням ефективності і не використовує парні прилади, обчислення було використане для визначення варіабельності методів і є це не є суворою вимогою відтворюваності, як визначено в стандарті EN 15267-3 [11]. Стандартне відхилення відмінностей, отриманих в результаті парних вимірювань, позначають як S_D .

Перед отриманням цих результатів парні набори даних аналізували на відхилення від норми за допомогою тесту Груббса. Дві пари результатів для трубок Піто S-типу визначені як випадкові. Ці дані були виключені зі статистичного аналізування. Це прийнятно за умови, що аналогічне виключення випадкових значень здійснюють і за використання методів визначення потоку для обчислення масових викидів або калібрування АВС.

Невизначеності ручних методів також були визначені на основі оцінювання парних даних, проведеного відповідно до ISO 20988:2007, і наведені в таблиці 6.G.9. План експерименту можна розглядати як парні вимірювання двох ідентичних вимірювальних систем, згідно з ISO 20988:2007 як план експерименту А6. Аналізування надає інформацію про невизначеність, обумовлену зміщенням між двома вимірами. Процедура оцінювання невизначеності використовує відносний розмір елемента u_B порівняно зі стандартною невизначеністю u для визначення методу, який слід використовувати для оцінювання ступенів свободи, а отже, і

коефіцієнта охоплення, який слід використовувати для визначення розширеної невизначеності $U_{0,95}$. Для трубок Піто L-типу це оцінювання відповідало критерію $u_B^2 \leq 0,5u(j)^2$, за якого кількість ступенів свободи дорівнює кількості парних тестів. Інші методи не відповідають цьому критерію, і для них застосовують стандарт ISO 20988:2007, 7.4.

Таблиця 6.G.7 – Невизначеність парних ручних методів, використаних у другому валідаційному дослідженні, визначена на основі зведеного стандартного відхилення

Зведені стандартні відхилення для парних ручних методів			
Парні трубки Піто S-типу		Парні трубки Піто L-типу	
Середнє значення	27,86 м/с	Середнє значення	25,51 м/с
Зведене стандартне відхилення	0,29 м/с	Зведене стандартне відхилення	0,09 м/с
k	2,11	k	2,08
$U_{95\%}$	0,60 м/с	$U_{95\%}$	0,17 м/с
Коефіцієнт варіації	1,03 %	Коефіцієнт варіації	0,34 %
$U_{95\%,rel}$	2,18 %	$U_{95\%,rel}$	0,70 %
Парні трубки Піто 2D-типу		Парні трубки Піто 3D-типу	
Середнє значення	26,43 м/с	Середнє значення	25,32 м/с
Зведене стандартне відхилення	1,20 м/с	Зведене стандартне відхилення	0,60 м/с
k	2,09	k	2,08
$U_{95\%}$	2,52 м/с	$U_{95\%}$	1,26 м/с
Коефіцієнт варіації	4,55 %	Коефіцієнт варіації	2,38 %
$U_{95\%,rel}$	9,53 %	$U_{95\%,rel}$	4,96 %

Таблиця 6.G.8 – Варіабельність, визначена для парних ручних методів для другого промислового валідаційного дослідження

Параметр	Варіабельність			
	S-тип	L-тип	2D	3D
s_D	0,09	0,11	0,85	0,51
k	2,31	2,23	2,26	2,23
Var_f	0,21	0,25	1,90	1,15

При інтерпретації цих значень невизначеності слід враховувати, що невизначеності, визначені для трубок Піто S-, 3D- і 2D-типу, враховують ефект визначення середнього потоку через повітровід за той самий період часу, але при цьому сітка вимірювання витрати визначають в іншому порядку між двома методами (тобто трубка S_1 буде відбирати зразки сітки за той самий період часу, що і трубка S_2 , але вони будуть відбирати зразки в різних частинах сітки одночасно, в той час як трубки L_1 і L_2 будуть відбирати зразки одночасно в одних і тих самих точках сітки). Різниця між невизначеностями для трубок L-типу та іншими методами полягає в тому, що існує вплив процесу відбирання проб, і тому невизначеності для трубок Піто S-, 3D- і 2D- типу можна вважати більш репрезентативними для невизначеності однієї точки калібрування, виконаної за допомогою цих методів, а невизначеність для трубки Піто L-типу можна вважати репрезентативною для невизначеності окремих точкових вимірювань витрати, виконаних за допомогою цих трубок Піто.

Таблиця 6.С.9 – Аналізування невизначеності результатів парного ручного методу другого промислового валідаційного дослідження

Парні трубки Піто L-типу	
Зміщення, u_B	0,05 м/с
Стандартна невизначеність, $u(j)$	0,09 м/с
Розширена невизначеність, $U_{0,95}$	0,19 м/с
Парні трубки Піто S-типу	
Зміщення, u_B	0,53 м/с
Стандартна невизначеність, $u(j)$	0,58 м/с
Розширена невизначеність, $U_{0,95}$	1,31 м/с
Парні трубки Піто 3D-типу	
Зміщення, u_B	0,70 м/с
Стандартна невизначеність, $u(j)$	0,60 м/с
Розширена невизначеність, $U_{0,95}$	1,36 м/с
Парні трубки Піто 2D-типу	
Зміщення, u_B	1,50 м/с
Стандартна невизначеність, $u(j)$	1,20 м/с
Розширена невизначеність, $U_{0,95}$	2,72 м/с