

ДОДАТОК 6.В

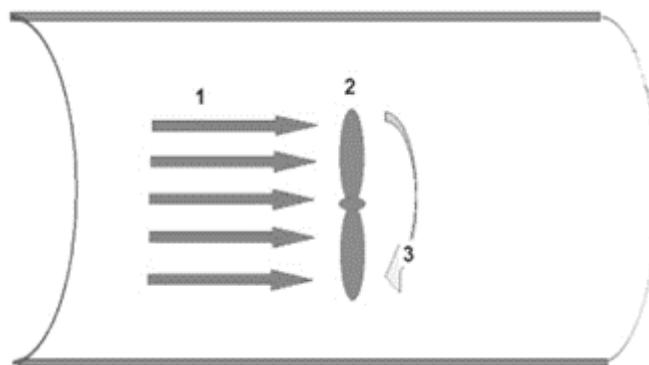
(обов'язковий)

ЛОПАТЕВИЙ АНЕМОМЕТР

6.В.1 Суть дії лопатевого анемометра

Суть вимірювання за допомогою лопатевого анемометра залежить від пропорційності швидкості обертання лопаті до швидкості потоку рідини v_∞ , в яку його встановлюють.

Спрощений принцип роботи лопатевого анемометра показаний на рисунку 6.В.1.



Умовні позначки:

- 1 v_∞ м/с — швидкість потоку
- 2 — лопать
- 3 f s^{-1} — частота обертання

Рисунок 6.В.1 – Лопатевий анемометр

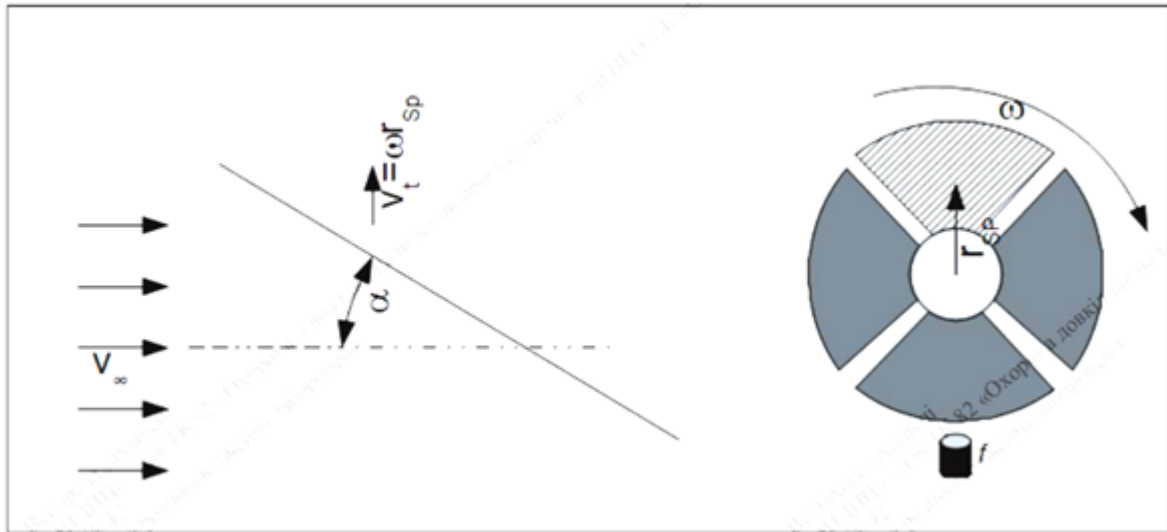
Припускаючи, що тертя відсутнє, а маса лопатевого колеса дорівнює 0, результуюча характеристика є винятково геометричною.

Заданими вхідними змінними є:

- а) швидкість зближення v_∞ в осьовому напрямку;
- б) частота характеристики, f ;
- с) геометрія лопатевого колеса або лопаті лопатевого колеса з центром у сферичних координатах, r_{Sp} ;

d) кількість лопатей, наприклад, $n_F = 4$.

Для обчислення також використовують кутову швидкість, $\bar{\omega} = 2\pi(f/n_F)$, і колову швидкість $v_t = \bar{\omega}r_{Sp}$. Див. Рисунок 6.В.2.



Умовні позначки:

v_∞ — швидкість потоку

α — кут нахилу лопаті

f — частота зчитування

ω — кутова частота

r_{Sp} — геометрія лопатевого колеса

v_t — колова швидкість

Рисунок 6.В.2 – Суть дії лопатевого анемометра

Надзвичайно важливим є правильне значення r_{Sp} лопаті. Враховуючи, що діюче зусилля стискання можна визначити як постійну діючу силу по всій площі, її можна замінити діючим єдиним зусиллям в центрі лопаті, в обчислювальній зоні.

Лопатеве колесо приводять в дію за допомогою індуктивного безконтактного перемикача. За допомогою ще одного індуктивного перемикача можна виміряти напрямок обертання і визначити напрямок потоку. Цей спосіб вимірювання кутової частоти не створює гальмівного впливу на лопатеве колесо. Забруднення не впливає на розпізнавання імпульсів. Завдяки низькій масі лопатевого колеса, яка в

залежності від моделі може становити десятки частки грама, його кутову частоту налаштовують в мілісекундному діапазоні в залежності від зміни швидкості.

Лопатевий анемометр має бути відкалібрований за витратами, репрезентативними для умов потоку анемометра, а використовувані точки калібрування мають відповідати діапазону його роботи (наприклад, подвійна максимальна витрата плюс фіксований відсоток від максимальної витрати).

Калібрування слід проводити в декількох точках, що охоплюють діапазон застосовуваних швидкостей. Калібрування має забезпечувати метрологічну простежуваність. Цього можна досягти, наприклад, за допомогою проточної установки, швидкість потоку якої можна простежити за допомогою лазерної доплерівської анемометрії.

Вимоги до робочих характеристик наведені в таблиці 6.В.1.

Таблиця 6.В.1 – Експлуатаційні вимоги до лопатевих анемометрів

Параметр	Критерій	Метод визначення
Мінімальна швидкість	від 0,2 м/с до 0,5 м/с	Залежно від характеристик газу та лопатей
Вплив частинок	В технологічному середовищі наявність волокон не допускається. Концентрація твердих частинок в чистому газі (до 50 мг/м ³) не створює жодного впливу	Оцінювання ефективності датчика температури відповідно до стандартів для термопар
Вплив температури	Відсутність впливу в зазначеному діапазоні	Застосування за температур, для яких передбачена короточасна робота, має тривати кілька хвилин, щоб уникнути пошкодження датчика
Вплив вологості	Відсутність впливу вологості, уникати попадання крапель	
Невизначеність вимірювання швидкості потоку, $u(v)$	від 0,01 м/с до 0,02 м/с ± від 0,02 м/с до 0,08 м/с	Залежно від типу лопаті
Абсолютна похибка вимірювання (відтворюваність вихідних величин) e_p	від 0,01 м/с до 0,02 м/с	Залежно від типу лопаті
Невизначеність вимірювання частоти сканування, $^a ku(f)$	від ± 0,02 м/с до ± 0,08 м/с	Залежно від типу лопаті
^a $k = 2$ для випробуваних лопатевих анемометрів типу Höntzsch		

6.В.2 Обчислення

6.В.2.1 Загальні положення

Характеристична осьова швидкість у випадку, коли тертя відсутнє, v_∞ , може бути обчислена за формулою (6.В.1):

$$v_\infty = \frac{v_t}{\tan\alpha} = \frac{\omega r_{Sp}}{\tan\alpha}, \quad (6.В.1)$$

де v_t – колова швидкість, $v_t = \bar{\omega} r_{Sp}$;

α – кут нахилу лопаті;

r_{Sp} – геометрія лопатевого колеса.

6.В.2.2 Нижня межа діапазону

Однак на практиці тертя та маса відіграють важливу роль. В результаті нижчою межею діапазону є мінімальна швидкість, так звана швидкість запуску, v_0 , для подолання тертя в підшипниках і інерції лопатевого колеса. Нижче цього значення вимірювання не виконують.

Крім того, базову формулу (6.В.1) можна розширити до:

$$v_\infty = K(\rho_0, \eta_{dyn}) \frac{v_t}{\tan\alpha} + v_0, \quad (6.В.2)$$

де вводиться нелінійний калібрувальний коефіцієнт $K(\rho_0, \eta_{dyn})$, що залежить від густини ρ_0 та динамічної в'язкості η_{dyn} .

6.В.2.3 Верхня межа діапазону

Верхню межу вимірювання швидкості потоку за допомогою лопатевого колеса визначається виробником і базується на вимогах до визначеного терміну служби датчика з урахуванням зростаючого механічного навантаження, викликаного збільшенням швидкості, можливостей калібрувальних установок виробника і пристрою виведення сигналу лопатевого колеса датчика.

Обертання лопатевого колеса, згідно 6.В.2.2, залежить тільки від густини та в'язкості середовища. Тиск, температура, вологість або можливі частинки пилу впливають на характеристичну осьову швидкість тільки при значних змінах густини або в'язкості і відіграють значну роль тільки з огляду на довговічність, тобто здатність до зношування.

Для сили, що діє на лопатеве колесо, F , та результуючої колової швидкості v_t має значення динамічний тиск на лопатеве колесо, p_{dyn} :

$$F \approx p_{dyn} = \frac{\rho}{2} v_{\infty}^2 = c, \quad (6.B.3)$$

де ρ – густина;
 v_{∞} – осьова швидкість;
 c – константа.

Якщо при вимірюванні в повітрі або газах фактичне значення густини ρ_1 відхиляється від значення густини під час калібрування ρ_0 , то значення, що відображаються з лопатевого колеса $v_{\infty,0}$ при вимірюванні в газах із середньою густиною ρ_1 , дорівнюють фактичній швидкості.

$$v_{\infty,1} = v_{\infty,0} - \Delta v_{0-1}, \quad (6.B.4)$$

де $v_{\infty,1}$ – осьова швидкість;
 $v_{\infty,0}$ – вимірне значення осьової швидкості на лопаті;
 Δv_{0-1} – регулювання характеристичної кривої.

$$\Delta v_{0-1} = v_{0,0} - v_{0,1} = v_{0,0} \left(1 - \sqrt{\frac{\rho_0}{\rho_1}} \right), \quad (6.B.5)$$

де $v_{0,0}$ – вказане значення початку діапазону;
 $v_{0,1}$ – реальний початок діапазону;
 ρ_0 – задана густина;
 ρ_1 – реальна густина.

Це означає, що характеристику (6.B.2) компенсують різницею значень початкової швидкості.

6.B.3 Обчислення невизначеності та калібрування

Невизначеність залежить від точності вимірювання кутової частоти (а отже, і частоти сканування) і відтворюваності вихідних величин.

Для лопатевого анемометра з чотирма лопатями точність становить $(\omega/4) \pm 1$ імпульс, де ω – кутова частота.

Невизначеність вимірювання швидкості потоку $u(v)$ лопатевим анемометром обумовлена абсолютною похибкою вимірювання (відтворюваністю вихідних величин), e_p , і невизначеністю вимірювання частоти сканування $u(f)$, Гц:

$$u(f) = (f + 1) \frac{(v_{max} - v_{min})}{f_{max}} + v_{min} - (f - 1) \frac{(v_{max} - v_{min})}{f_{max}} - v_{min}, \quad (6.B.6)$$

або

$$u(f) = 2 \cdot \frac{(v_{max} - v_{min})}{f_{max}}, \quad (6.B.7)$$

де f – частота сканування;

v_{max} – максимальна швидкість для відповідного типу лопатей;

v_{min} – мінімальна швидкість для відповідного типу лопатей (початкова швидкість);

f_{max} – максимальна частота для відповідного типу лопатей;

e_p – для випробуваних лопатевих анемометрів швидкість становить від 0,01 до 0,02 м/с.

Примітка. Зверніть увагу, що значення e_p залежить від конструкції лопаті. Це значення можна обчислити, наприклад, відповідно до положень DIN 1319-3 [20]. Виробник зобов'язаний вказати це значення.

Таким чином, невизначеність вимірювання витрати становить:

$$u(v) = u(f) \pm e_p, \quad (6.B.8)$$

6.B.3.1 Приклад

Мінімальна швидкість, $v_{min} = 0,5$ м/с

Максимальна швидкість, $v_{max} = 40$ м/с

$e_p = 0,02$ м/с

Діаметр лопаті, $2r_{sp} = 22,8$ мм

Співвідношення $(f/v) = 29,25$

Максимальна частота обертання лопаті, $f_{max} = 1770$ Гц

$$u(f) = 2 \cdot \frac{(v_{max} - v_{min})}{f_{max}} = 2 \cdot \frac{(40 - 0,5)}{1770} = 0,04, \quad (6.B.9)$$

$$u(v) = u(f) \pm e_p = 0,02 \pm 0,04, \quad (6.B.10)$$

Таблиця 6.В.2 – Дані лінійної регресії для ручних методів на основі даних лабораторних випробувань

Метод:	Засіб	Нахил	Затримка, м/с
Лопатевий анемометр, лопать 1	Лопатевий анемометр	0,975	0,227
Лопатевий анемометр, лопать 1	Лопатевий анемометр	0,992	0,226

Таблиця 6.В.3 – Аналіз невизначеності відповідно до стандарту ISO 20988 для ручного методу лабораторного оцінювання

Засіб:	Зміщення	Критерії зміщення	Невизначеність	Розширена невиз-ність	Коефіцієнт охоплення
Лопатевий анемометр	0,0004	0,236	0,021	0,042	2

Таблиця 6.В.4 – Невідповідність, визначена в результаті лабораторного дослідження

Засіб:	Невідповідність діапазону випробування в 25 м/с, %	Критерії (EN 15267-3[11]), %
Лопать 1	1,05	3
Лопать 2	0,38	3