

## ВИЗНАЧЕННЯ РУШІЙНОГО МОМЕНТУ НА ЧУТЛИВОМУ ЕЛЕМЕНТІ ПЕРЕТВОРЮВАЧА ВИТРАТИ ПОВІТРЯ

Korobko I., Pisarets A.  
The National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv, Ukraine (korobko@kpi.ua)

### DRIVING TORQUE DETERMINATION ON THE AIR FLOW TRANSDUCER SENSITIVE ELEMENT

*Стаття направлена на розв'язання задачі точного вимірювання витрати і кількості повітря при проведенні діагностики органів дихання людини. В роботі розглядаються питання визначення рушійного моменту, який діє на лопаті чутливого елемента вимірювального перетворювача витрати повітря швидкісного типу. Одним із головних чинників що впливає на величину рушійного моменту, є характер розподілу швидкості потоку безпосередньо перед чутливим елементом. Виходячи з цього в роботі особлива увага приділяється врахуванню характеру розподілу швидкості потоку вимірюваного середовища перед чутливим елементом та його взаємодії із конструктивними елементами приладу. Напрямок подальших досліджень пов'язаний з визначенням моментів опору обертанню чутливого елемента перетворювача витрати.*

*Ключові слова:* витрата повітря, лічильники, математична модель, рушійний момент

#### Вступ. Постановка проблеми

В сучасній медицині важливе місце займають методи діагностики органів людини. Для дослідження функцій дихання застосовуються спірометричні прилади та системи (СПС). Дослідження функції дихання здійснюють при проведенні скрінінгових обстежень, лікувально-трудої експертизи, оцінки прогнозу захворювання і операційного ризику, спортивно-медичної діагностики, контролі ефективності лікувальних і реабілітаційних заходів, астмамоніторингу, для індивідуального підбору ліків та вибору стратегії і плану лікування. Спірографічний метод дослідження дозволяє отримати інформацію про зміни об'єму легень в часі, тобто про об'ємну швидкість дихання, або іншими словами – життєву ємність легень. При спірографічних дослідженнях отримують результати про стан одного з важливих ланцюгів легеневого дихання – апарату вентиляції. Порушення вентиляції при переважній більшості захворювань легень є провідними в комплексі патофізіологічних відхилень і в значній мірі визначають клінічну картину легеневої недостатності, знижуючи функціональні можливості хворої людини з патологією легень.

В залежності від режиму, в якому проводиться спірографія, можна отримати характеристику або процес вентиляції, або стан апарату, що забезпечує процес вентиляції. Такі дослідження не обтяжливі для хворого, займають не багато часу, більшість елементів можуть багаторазово повторюватись, що забезпечує об'єктивність результату, але часто виконуються з великими методичними похибками, отримані дані оцінюються довільно, що може привести до помилкових діагностичних висновків.

Прийняття ефективних рішень по розробці методик лікування залежить від достовірності результатів діагностики, яка напряму залежить від метрологічних характеристик СПС. Спірометричні прилади базуються на вимірювальних перетворювачах витрати (ВПВ) газу та газових сумішей [1, 2].

**Мета роботи** полягає у визначенні однієї із основних складових математичної моделі ВПВ – рушійного моменту на чутливому елементі швидкісного перетворювача у вигляді прямолопатної турбіни.

#### Постановка задачі

На сьогоднішній день для створення СПС набули широкого використання ВПВ, які побудовані на базі швидкісних методів вимірювання витрати та кількості газів [3]. Застосування турбінного двонаправленого вимірювального перетворювача витрати повітряного потоку обумовлено такими основними його перевагами: мала інерційність; лінійність статичної характеристики; малий опір диханню пацієнта; відсутність залежності точності вимірювань від атмосферного тиску, температури навколишнього середовища і вологості повітря; не потребує щоденного калібрування; висока повторюваність результатів вимірювання; простота очищення і стерилізації завдяки змінному чутливому елементові та відсутність джерела живлення

В той же час такі СПС, за сучасних вимог до достовірності та якості діагностичної інформації, потребують вдосконалення, направлені на підвищення їх метрологічних та експлуатаційних характеристик. В свою чергу на якість вимірювання фізичних величин суттєво впливають: діапазон вимірювання об'ємів,

діапазон вимірювання потоку, мінімальна чутливість за об'ємом, мінімальна чутливість по потоку, похибка вимірювання потоку, робоча температура навколишнього середовища, робоча вологість.

Найбільш ефективним шляхом розробки сучасних та вдосконалення існуючих вимірювальних приладів є їх комп'ютерне проектування із знаходженням оптимальних значень конструктивних, геометричних та функціональних параметрів. При цьому важливим етапом розв'язання таких задач є розробка математичної моделі ВПВ, що описує взаємодію вимірюваного середовища (повітря, яке вдихається і видихається людиною) із конструктивними елементами самого приладу, вплив їх параметрів, зовнішніх факторів та умов проведення діагностики і метрологічних та експлуатаційних характеристик самого вимірювального приладу. Однією з головних проблем при розробці математичної моделі ВПВ повітря швидкісного типу є знаходження рушійного моменту що діє на чутливий елемент вимірювального перетворювача, який визначає його метрологічні характеристики.

#### Визначення рушійного моменту

Принцип дії ВПВ, в основу яких покладено швидкісний метод вимірювання витрати газів та газових сумішей, полягає у визначенні кількості обертів або частоти обертання чутливого елемента (ЧЕ), яким є прямолопатна турбінка. Вимірюване середовище до ВПВ підводиться аксіально із наступною зміною напрямку потоку у вихоронаправляючому апараті перед ЧЕ. Такий ВПВ конструктивно виконується у вигляді змінної капсули (рис.1) і складається з корпусу 1, вхідного вихоронаправляючого апарату 2, де потоку надається круговий рух із обертанням навколо поздовжньої вісі корпусу. Закручений потік потрапляє на ЧЕ 3, який обертається на вісі 4 в опорах 5. Кількість обертів ЧЕ та частота його обертання визначаються вторинним вимірювальним перетворювачем 6, що побудований з використанням оптичного методу знімання інформації з елементів, що рухаються. Після проходження потоку вимірювальним каналом, у вихідному вихоронаправляючому апараті 7 йому з обертального надається поступальний рух вдовж вісі перетворювача.

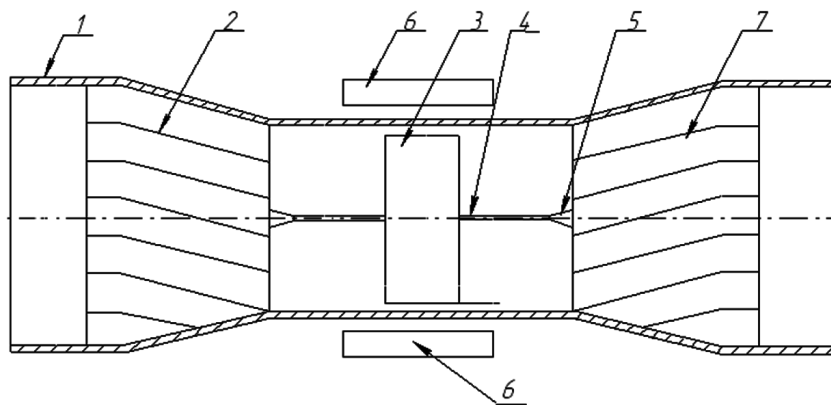


Рис. 1. Принципова схема спірометра; 1-корпус; 2 - вхідний вихоронаправляючий апарат; 3 - ЧЕ; 4 - вісь; 5 - опори ЧЕ; 6 - вимірювальний перетворювач; 7 - вихідний вихоронаправляючий апарат

Математичну модель ВПВ в загальній формі можна представити виразом [3, 4]

$$J \frac{d\omega}{dt} = M_p - \sum M_{on},$$

де  $J$  – момент інерції ЧЕ;  $\omega$  - кутова швидкість обертання ЧЕ;  $M_p$  - рушійний момент ЧЕ;  $\sum M_{on}$  - сума моментів опору руху ЧЕ.

Рушійний момент на ЧЕ визначається добутком сили гідродинамічного напору, що діє на ЧЕ  $F_g$  та середнього (ефективного) радіусу лопаті ЧЕ  $r_{ef}$

$$M_p = F_g \cdot r_{ef} \quad (1)$$

Ефективний радіус лопаті можна визначити за виразом

$$r_{ef} = r_k - r_o, \quad (2)$$

де  $r_k$  - зовнішній радіус турбінки;  $r_o$  – координата точки прикладення рівнодіючої сили гідродинамічного напору  $F_g$ .

Сила гідродинамічного напору, що діє на ЧЕ, є сумою сил гідродинамічного напору, які діють на кожен лопать даного ЧЕ

$$F_g = \sum_{i=1}^n F_{g_i},$$

де  $F_{g_i}$  - сила гідродинамічного напору на  $i$ -ту лопать ЧЕ;  $n$  – кількість лопатей ЧЕ.

Припускаючи, що геометричні та конструктивні параметри кожної з лопатей даного ЧЕ ідентичні, як і характер їх обтікання вимірюваним середовищем, то силу гідродинамічного напору, що діє на ЧЕ, можна визначити використовуючи залежність

$$F_g = n \cdot F_{g1}. \quad (3)$$

Силу гідродинамічного напору, що виникає на одній лопаті, можна визначити за виразом [5]

$$F_{g1} = \int_S \frac{c_x \rho U(y, z) W_m(y, z)}{2} dS, \quad (4)$$

де  $c_x$  - коефіцієнт лобового опору, який залежить від форми лопаті та числа Рейнольдса;  $\rho$  - густина вимірювального середовища (повітря);  $U(y, z)$  - швидкість вимірюваного потоку в каналі обтікання лопаті;  $dS$  - елементарна площа лопаті;  $W_m(y, z)$  - місцева швидкість потоку в живому перерізі ЧЕ.

Площу поперечного перерізу каналу обтікання можна визначити за формулою

$$S_0 = l_k (r_{\text{вк}} - r_m), \quad (5)$$

де  $l_k$  - ширина вимірювальної камери де обертається ЧЕ;  $r_{\text{вк}}$  - внутрішній радіус вимірювальної камери;  $r_m$  - радіус маточини ЧЕ.

Враховуючи залежність (5), середню швидкість потоку повітря у вимірювальній камері можна визначити за виразом

$$U_{cp} = \frac{Q}{l_k (r_{\text{вк}} - r_m)},$$

де  $Q$  - витрата повітря, що проходить крізь вимірювальну камеру;

Місцева швидкість потоку в живому перерізі ЧЕ описується залежністю [5]

$$W_m(y, z) = \frac{U(y, z) - v(y)}{\left(1 - \tau \frac{S}{S_0}\right)^2}, \quad (6)$$

де  $v$  - кругова швидкість обертання ЧЕ (крильчатки);  $S$  - площа міделя лопаті;  $\tau$  - поправочний коефіцієнт, що враховує вплив форми лопаті ЧЕ і стиснення поперечного перерізу каналу обтікання лопаті.

Кругова швидкість обертання крильчатки визначається за залежністю

$$v(y) = \omega \cdot y. \quad (7)$$

Площу міделя лопаті можна визначити за формулою

$$S = h (r_k - r_m),$$

де  $h$  – ширина лопаті турбіни.

Враховуючи залежності (6) та (7), вирази (3) та (4) набудуть виду

$$F_{g1} = \frac{c_x \cdot \rho}{2 \left(1 - \tau \frac{S}{S_0}\right)^2} \int_0^h \int_{y_1=r_m}^{y_2=r_k} U(y, z) [U(y, z) - \omega \cdot y] dy dh.$$

$$F_g = \frac{n \cdot c_x \cdot \rho}{2 \left(1 - \tau \frac{S}{S_0}\right)^2} \int_0^h \int_{y_1=r_m}^{y_2=r_k} U(y, z) [U(y, z) - \omega \cdot y] dr dh. \quad (8)$$

Координату точки прикладення рівнодіючої сили гідродинамічного напору  $F_g$  від сил  $F_{g_i}$  можна визначити за виразом [6]

$$r_o = \frac{\int_0^h \int_{y_1=r_m}^{y_2=r_k} y \cdot U(y,z) [U(y,z) - \omega \cdot y] dy dh}{\int_0^h \int_{y_1=r_m}^{y_2=r_k} U(y,z) [U(y,z) - \omega \cdot y] dy dh}.$$

Враховуючи вирази (2) та (8) вираз (1) набуде виду

$$M_p = \frac{(r_k - r_o) \cdot n \cdot C_x \cdot \rho}{2 \left(1 - \tau \frac{S}{S_0}\right)^2} \int_0^h \int_{y_1=r_m}^{y_2=r_k} U(y,z) [U(y,z) - \omega \cdot y] dy dh. \quad (9)$$

Однією із складностей при знаходженні рушійного моменту, що діє на турбінку, є визначення функціональної залежності коефіцієнта лобового опору  $C_x$  від кута атаки лопаті вимірюваним потоком. Враховуючи той факт, що вимірюване середовище перед вимірювальною камерою закручується у вихоронаправляючому апараті і попадає на лопаті ортогонально до їх площин, можна вважати, що значення коефіцієнту лобового опору  $C_x$  за реальних умов вимірювання не змінюється. Виходячи з цього, при інженерних розрахунках для знаходження величини  $C_x$  можна використовувати дані, що були отримані при обтіканні плоскої прямокутної пластинки [4].

Вимірюване середовище перед ЧЕ рухається по перерізу прямокутної форми, попадаючи на лопать турбіни. Якщо розглядати рух вимірюваного середовища по трубопроводу прямокутного перерізу із сторонами  $a$  і  $b$  і задати форму перерізу у площині  $yz$  рівняннями  $y = \pm a$  та  $z = \pm b$ , то профіль швидкості і величину середньої швидкості можна представити виразами [7]

$$U(y,z) = \frac{16\Delta p a^2}{\pi^3 \mu l_x} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{n+1}}{(2n-1)^3} \left[ 1 - \frac{ch \frac{(2n-1)\pi z}{2a}}{ch \frac{(2n-1)\pi b}{2a}} \right] \cos \frac{(2n-1)\pi y}{2a}; \quad (10)$$

$$U_{cp} = \frac{\Delta p a^2}{3\mu l_x} \left[ 1 - \frac{192a}{\pi^5 b} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{th \frac{(2n-1)\pi b}{2a}}{(2n-1)^5} \right] = \frac{\Delta p a^2}{3\mu l_x} f\left(\frac{b}{a}\right), \quad (11)$$

де  $\Delta p$  - втрата тиску на в'язке тертя;  $\mu$  - динамічний коефіцієнт в'язкості;  $l_x$  - довжина шляху проходження вимірюваного середовища по вимірювальному каналу.

Враховуючи те що ряд, який входить до виразу (11) швидко сходиться, для практичних розрахунків достатньо обмежитися утриманням його першого члену. В цьому випадку функція  $f\left(\frac{b}{a}\right)$  може бути визначена за формулою [7]

$$f\left(\frac{b}{a}\right) \approx 1 - \frac{192a}{\pi^5 b} th\left(\frac{\pi b}{2a}\right). \quad (12)$$

З урахуванням виразу (12) залежність (11) набуде виду

$$U_{cp} = \frac{\Delta p a^2}{3\mu l_x} \left[ 1 - \frac{192a}{\pi^5 b} th\left(\frac{\pi b}{2a}\right) \right]. \quad (13)$$

Враховуючи залежність (10) математична модель рушійного моменту (9) набуде виду

$$M_p = \frac{(r_k - r_o) \cdot n \cdot C_x \cdot \rho}{2 \left(1 - \tau \frac{S}{S_0}\right)^2} \int_0^h \int_{y_1=r_m}^{y_2=r_k} \frac{16\Delta p a^2}{\pi^3 \mu l_x} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{n+1}}{(2n-1)^3} \left[ 1 - \frac{ch \frac{(2n-1)\pi z}{2a}}{ch \frac{(2n-1)\pi b}{2a}} \right] \cos \frac{(2n-1)\pi y}{2a} \times \left[ \frac{16\Delta p a^2}{\pi^3 \mu l_x} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{n+1}}{(2n-1)^3} \left[ 1 - \frac{ch \frac{(2n-1)\pi z}{2a}}{ch \frac{(2n-1)\pi b}{2a}} \right] \cos \frac{(2n-1)\pi y}{2a} - \omega \cdot y \right] dy dh \quad (14)$$

Отримана математична модель рушійного моменту (14) є однією із важливих складових математичної моделі ВПВ повітря, які використовують для побудови СПС.

### Висновки

Отримані математичні залежності одного з важливих параметрів математичної моделі ВПВ - рушійного моменту дозволяють ефективно визначати силову дію вимірюваного середовища на чутливий елемент ВПВ повітря та здійснювати його оцінку і на їх базі аналізувати чинники, що впливають на метрологічні характеристики вимірювальної системи.

Подальші дослідження будуть направлені на визначення моментів опору обертанню ЧЕ ВПВ, які є складовими елементами математичної моделі ВПВ повітря.

*Аннотация.* Статья направлена на решение задачи точного измерения расхода и количества воздуха при проведении диагностики органов дыхания человека. В работе рассматриваются вопросы определения движущего момента, действующего на лопасти чувствительного элемента измерительного преобразователя расхода скоростного типа. Одним из основных факторов, влияющих на величину движущего момента, является характер распределения скорости потока непосредственно перед чувствительным элементом. Исходя из этого, особое внимание в работе уделяется учету характера распределения скорости потока измеряемой среды перед чувствительным элементом и его взаимодействию с конструктивными элементами прибора. Дальнейшие исследования связаны с определением моментов сопротивления вращению чувствительного элемента преобразователя расхода.

*Ключевые слова:* расход воздуха, счетчики, математическая модель, движущий момент

*Abstract.* Article aims to solve the problem of air flow rate and quantity accurate measurement for diagnosing human respiratory. The problems of driving torque determination on sensitive element blade of velocity type measuring flow rate transducer are considered. One of the main factors which affect on the driving torque value is the flow velocity distribution just before sensitive element. Based on this, particular attention is paid to the nature of measuring flow velocity distribution before the sensitive element and its interaction with instrument constructive elements. Further researches related to the definition of resistance moments to sensitive element rotation.

*Keywords:* air flow rate, meter, mathematical model, driving torque.

1. Кларк Д. Медицинские приборы. Разработка и применение. К.: Медторг, 2004. – 340 с.
2. Годлевский Л.С., Креснюк В.И., Садлий А.В. Медицинская аппаратура. Принципы действия и применения. М.: Нептун-Технология, 2002. – 392 с.
3. Бошняк Е.М., Бызов Л.Н. Тахометрические расходомеры. – М.:Машиностроение., 1968 – 212 с.
4. Бобровников Г.Н., Камышев Л.А. Теория и расчет турбинных расходомеров.–М.: Издательство стандартов 978.–128с
5. Идельчик И.Е. Справочное пособие по гидравлическим сопротивлениям. – М.: Машиностроение, 1975. – 543 с.
6. Сопротивление материалов / Писаренко Г.С. и др. – К.: Вища школа, 1973. – 668 с.
7. Повх И.Л. Техническая гидромеханика. 2-е изд., доп. Л.: Машиностроение, 1976.- 504с.

### REFERENCES

1. Klark D. Medicinskie pribory. Razrabotka i primenenie. Kyiv: Medtorg, 2004. 340 p
2. Godlevskij L.S., Kresnjuk V.I., Sadlij A.V. Medecinskaja apparatura. Principy dejstvija i primenenija. Moskow: Neptun-Tehnologija, 2002. 392 p.
3. Boshnjak E.M., Byzov L.N. Tahometricheskie rashodomery. Moskow: Mashinostroenie, 1968, 212 p.
4. Bobrovnikov G. N., Kamyshev L. A. Teorija i raschet turbinyh rashodomerov. Moskow: Izdatelstvo standartov, 1978. 128 p
5. Idel'chik I.E. Spravochnoe posobie po gidravlicheskim soprotivlenijam. Moskow: Mashinostroenie, 1975. 543 p.
6. Soprotivlenie materialov / Pisarenko G.S. i dr. Kyiv: Viwa shkola, 1973. 668 p.
7. Povh I.L. Tehnicheskaja gidromehanika. 2-e izd., dop. Leningrad: Mashinostroenie, 1976. 504 p.