

Н. Г. Куць, к. т. н., доц.

ПРО РОБОТУ ВІДКРИТОЇ СКЛАДНОЇ МЕХАНІЧНОЇ СИСТЕМИ В АВТОМОБІЛЬНОМУ ТРАНСПОРТІ

Показано роботу вентилятора як теплового насоса. З аналізу загальної схеми роботи вентилятора визначено коефіцієнт перетворення. У процесі взаємодії лопаток вентилятора з навколишньою атмосферою розглянуто: ударний механізм окремих молекул повітря, відцентрові сили і гідродинамічні сили, що виникають, обумовлені законом Бернуллі. Встановлено, що потужність споживана вентилятором, залежить від частоти обертання не в кубічній степені, а в степені 3/2 з переходом в лінійний зв'язок.

Ключові слова: Вентилятор, тепловий насос, навколишнє середовище, ламінарна течія, зривна течія, енергосистема, кластер.

Вступ

У сучасних умовах енергетична криза все починає виявлятися через обмеженість природних вуглеводневих видів палива (торфу, вугілля, нафти, газу) і постійного зростання цін на ці види палива. Вихід з положення, що створилося, намагаються знайти в різних напрямках. Особливе значення приділяється способам отримання максимального коефіцієнта перетворення одного виду енергії в іншій. У цій області проводяться дослідження використання низькопотенційного тепла навколишнього середовища із застосуванням теплових насосів.

Автомобіль, як і будь-який інший транспортний засіб, що рухається в земній атмосфері, слід розглядати як складну енергосистему відкритого типу. В процесі взаємодії рухомого транспортного засобу з навколишньою атмосферою може відбуватися або передача енергії від рухомого об'єкту в навколишнє середовище, або навпаки – середовище передає свою енергію рухомому об'єкту.

При русі транспортного засобу виникає взаємодія його з навколишнім повітряним середовищем. Сполучною ланкою передачі енергії «рухомий об'єкт – навколишнє середовище» або «навколишнє середовище – рухомий об'єкт» є вентилятор. Тому необхідно з'ясувати:

- які взаємодії виникають в процесі формування вентилятором повітряного потоку;
- визначити умови, при яких вентилятор переходить в режим роботи теплового насоса;
- розробити алгоритм і програму для комп'ютерного моделювання роботи вентилятора як теплового насоса.

Аналіз публікацій

На сьогодні в енергетиці виникла практично революційна ситуація, коли почалися інтенсивні пошуки нових способів отримання і перетворення енергії [3]. У процесі роботи теплових насосів реалізуються умови, коли складна енергосистема стає відкритою. У [4] показано, що при роботі теплового насоса навколишнє середовище є активним середовищем. З цих позицій розглянемо роботу вентилятора як відкритої системи, який використовується для охолодження різних нагрівальних елементів у складних енергосистемах.

Основна частина

Як відбувається взаємодія повітряного потоку з лопатями вентилятора. Представимо лопаті вентилятора у вигляді однієї чверті еліпсоїдної поверхні з великою напіввіссю a і

малою напіввіссю b . Велика напіввісь з радіусом r_0 складає кут α . Вісь X направимо уздовж напівосі a , а вісь Y – уздовж напівосі b . Початок відліку розташуємо від осі обертання на відстані r_0 .

При такому розташуванні, як зображено на рис. 1, в зону розрідження з навколишнього середовища засмоктуватиметься повітря із швидкістю звуку

$$\bar{v} = \sqrt{\kappa \frac{P}{\rho}}, \tag{1}$$

де κ – відношення теплоємностей при постійному тиску і постійному об'ємі, P – тиск в навколишньому середовищі і ρ – густина повітря.

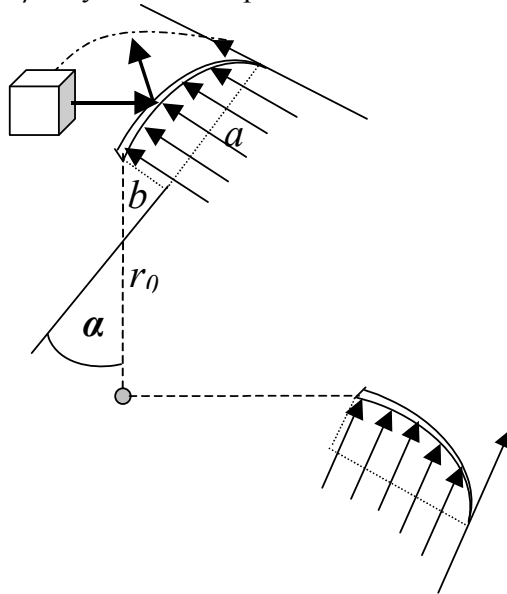


Рис. 1. Профіль лопаток і розташування їх відносно осі обертання вентилятора

Із швидкістю звуку \bar{v} кожна молекула повітря стикатиметься з кластерами, які формують кристалічний стан речовини, з якого виготовлені лопатки вентилятора. Частка енергії, яка при пружній взаємодії передаватиметься від молекули повітря до кластера лопатки вентилятора з урахуванням енергії зв'язку, в першому наближенні складе [6]:

$$\Theta = \frac{8Mm_a}{(2M + m_a)^2}, \tag{2}$$

де M – маса кластера.

Кожен кластер сприймає удари молекул повітря, потік яких формується в заданому напрямі із швидкістю звуку. При цьому реалізується звичний конвективний теплообмін. Відбите від лопатки повітря охолоджується до величини

$$\Delta T = T_\infty - \Theta \frac{m_a \bar{v}^2}{2k_B}. \tag{3}$$

Тут T_∞ – температура навколишнього повітря.

Важливо визначити, під яким кутом слід розташовувати лопатки вентилятора, щоб забезпечити охолодження повітря всією взаємодіючою площиною лопатки, і коли таке

охолодження створюватиме максимальне збільшення моменту на валу обертання вентилятора.

Приблизна схема обтікання лопатки вентилятора залежно від напрямку обертання показана на рис. 2.

Коли лопатки вентилятора рухаються своєю увігнутою стороною, то вони як би захоплюють потік (рис. 2. а).

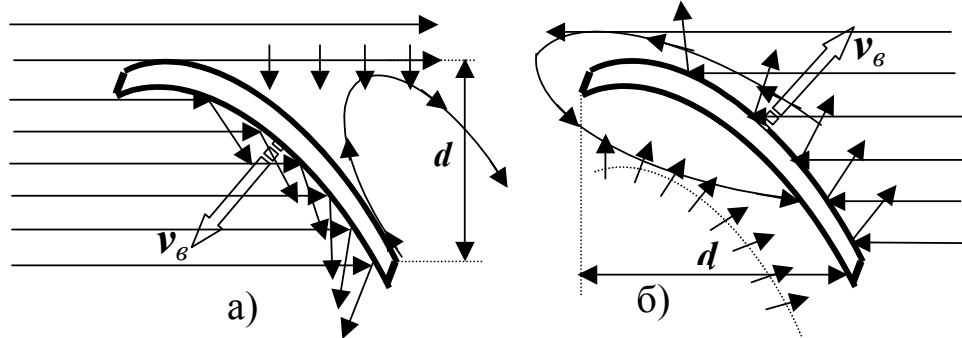


Рис. 2. Схема обтікання лопатки вентилятора при його обертанні: а) у напрямі увігнутої сторони і б) у напрямі опуклої сторони

Характер взаємодії молекул повітря при обертанні вентилятора у напрямі увігнутої поверхні лопатки наведений на рис. 3. Напрямок обертання показаний фігурною стрілкою. Для увігнутої поверхні на відстані x по великій напівосі удар молекул об поверхню відбувається під кутом δ .

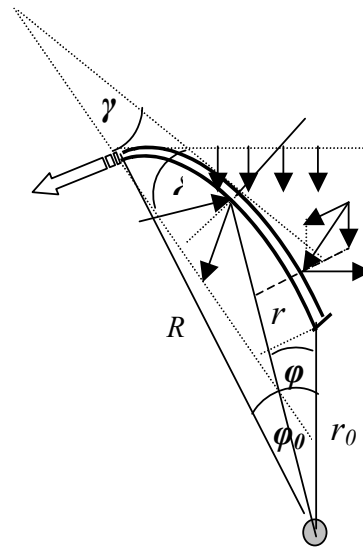


Рис. 3. Схема взаємодії молекул повітря з лопаткою вентилятора при обертанні увігнутою

З рисунка 3 випливає, що

$$\begin{aligned} \delta &= \pi/2 - (\alpha - \varphi); \\ \delta' &= \alpha - \varphi, \end{aligned} \tag{4}$$

а нормальна і тангенціальні швидкості дорівнюють відповідно:

$$\begin{aligned} v_n(x) &= 2\pi r n \cos(\delta'); \\ v_\tau(x) &= 2\pi r n \sin(\delta'). \end{aligned} \tag{5}$$

Сила дії на елемент dx визначається трьома складовими: ударна дія молекул повітря нормальної складової, відцентрова дія тангенціальної складової і дія закону Бернуллі внаслідок тангенціального руху повітря уздовж увігнутої поверхні. Долати необхідно тільки ударну дію молекул повітря і витратити енергію на формування потоку повітря за лопаткою.

Якщо вісь Z направити уздовж лопатки по радіусу r_0 , то маса повітря за час dt почне взаємодіяти з елементом ширини лопатки dl наступної величини:

$$dm = \rho_0 dl dz \sin(\delta') v_B dt = 2\pi r n \rho_0 dx dz dt \frac{\sin(\delta')}{\cos(\gamma)} \quad (6)$$

Тут: $dl = \sqrt{dx^2 + dy^2} = dx / \cos(\gamma)$, а кут γ визначається через похідну від еліпсоїдної кривої на відстані x уздовж великої напівосі еліпса.

$$\text{Час } dt = dl / v_\tau = dx / [2\pi r n \cos(\gamma) \sin(\delta')].$$

Враховуючи (5) і (6), всі три сили, діючі на елемент ширини лопатки dl , перпендикулярні радіусу обертання вентилятора, Необхідно всі ці сили вентилятору долати, і вони рівні:

$$\begin{aligned} dF_n &= 4\pi^2 r^2 n^2 \rho_0 dx dz \frac{\sin(\delta') \cos^2(\delta')}{\cos(\gamma)}; \\ dF_B &= 4\pi^2 r^2 n^2 \rho_0 dx dz \frac{\sin^2(\delta') \cos(\delta')}{\cos^2(\gamma)} \frac{dx}{r_{кр}}, \\ dF_B &= 2\pi^2 r^2 n^2 \rho_0 dx dz \frac{\sin^3(\delta')}{\cos(\gamma)}. \end{aligned} \quad (7)$$

Тут r – радіус елемента лопатки від осі обертання рівний:

$$r = \sqrt{[r_0 + c \cos(\alpha + \arctg(b/a) - c \cos(\alpha + \arctg(y(x)/(a-x)))]^2 + c^2 \sin^2(\alpha + \arctg(y(x)/(a-x))}$$

і в свою чергу $c = \sqrt{a^2 + b^2}$,

α – кут менше 45° установки лопатки на осі обертання вентилятора; $r_{кр}$ – радіус кривизни еліпсоїдної поверхні на відстані x уздовж великої напівосі a , що визначається з рівності похідної для еліпса і кола.

Звідси витікає, що

$$r_{кр} = \sqrt{a^4 / b^2 + (a^2 / b^2 - 1)x^2}. \quad (8)$$

Результуюча сила представляє собою подвійний інтеграл виду

$$F_{on} = - \int_0^a \int_0^h (dF_n + dF_B + dF_B) \frac{dx}{a} \frac{dz}{h}, \quad (9)$$

а результуючий момент сили:

$$M_{on} = - \int_0^a \int_0^h (dF_n + dF_B + dF_B) r \frac{dx}{a} \frac{dz}{h}. \quad (10)$$

Зростання температури повітря внаслідок ударної дії лопатками вентилятора відбудеться максимум на

$$\Delta T = \frac{m_a 4\pi^2 R^2 n^2}{6k_B}. \quad (11)$$

При $R = 0,1$ м і $n = 100$ Гц $\Delta T \sim 1,7$ К. Таку зміну температури потоку практично можна не враховувати.

У разі обертання вентилятора у напрямі опуклої поверхні (рис. 2 б) тільки одна сила перешкоджає руху, а решта сил, що виникають унаслідок обертання вентилятора, направлена в бік обертання. Тому енергоспоживання при заданій швидкості обертання різко зменшується і особливо при зростанні швидкості обертання вентилятора.

Характер взаємодії молекул повітря при обертанні вентилятора у напрямі опуклої

поверхні лопатки наведений на рис. 4. Напрямок обертання показаний фігурною стрілкою. Для опуклої поверхні на відстані x по великій напівосі удар молекул об поверхню відбувається під кутом δ .

З рис. 4 виходить, що

$$\begin{aligned} \delta &= \pi / 2 - (\gamma + \varphi_0 - \varphi); \\ \delta' &= \gamma + \varphi_0 - \varphi \end{aligned} \quad , \quad (12)$$

а нормальна і тангенціальна швидкості дорівнюють відповідно:

$$\begin{aligned} v_n(x) &= 2\pi r n \cos(\delta'); \\ v_\tau(x) &= 2\pi r n \sin(\delta'). \end{aligned} \quad (13)$$

Сила дії на елемент dx визначається трьома складовими: ударною дією молекул повітря нормальної складової, відцентровою дією тангенціальної складової і дією закону Бернуллі унаслідок тангенціального руху повітря уздовж опуклої поверхні. Додати необхідно тільки ударну дію молекул повітря.

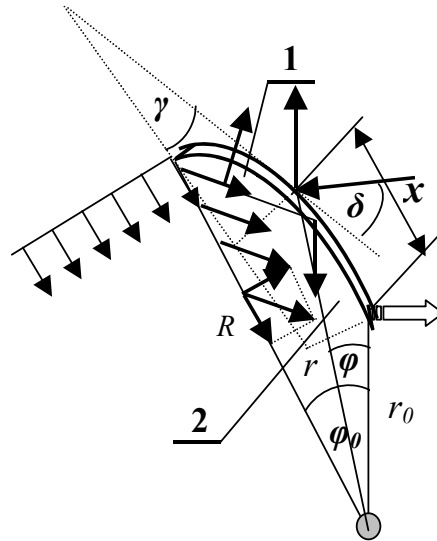


Рис. 4. Схема взаємодії молекул повітря з лопаткою вентилятора при обертанні опуклою стороною
Якщо вісь Z направити уздовж лопатки, то маса повітря за час dt почне взаємодіяти з елементом ширини лопатки dl наступної величини:

$$dm = \rho_0 dl dz \sin(\delta') v_B dt = 2\pi r n \rho_0 dx dz dt \frac{\sin(\delta')}{\cos(\gamma)}. \quad (14)$$

Тут $dl = \sqrt{dx^2 + dy^2} = dx / \cos(\gamma)$, а кут γ визначається через похідну від еліпсоїдної кривої на відстані x уздовж великої напівосі еліпса. Час $dt = dl / v_\tau = dx / [2\pi r n \cos(\gamma) \sin(\delta')]$.

Враховуючи (13) і (14), всі три сили, діючі на елемент довжини лопатки dl перпендикулярно радіусу обертання вентилятора рівні:

$$dF_n = 4\pi^2 r^2 n^2 \rho_0 dx dz \frac{\sin^2(\delta') \cos(\delta')}{\cos(\gamma)};$$

$$dF_B = 4\pi^2 r^2 n^2 \rho_0 dx dz \frac{\sin^3(\delta')}{\cos^2(\gamma) r_{kp}} dx;$$

$$dF_B = 2\pi^2 r^2 n^3 \rho_0 dx dz \frac{\sin^3(\delta')}{\cos(\gamma)}.$$
(15)

Результуюча сила представляє собою подвійний інтеграл виду

$$F_{on} = \int_0^a \int_0^h (-dF_n + dF_B + dF_B) \frac{dx dz}{a h},$$
(16)

а результуючий момент сили:

$$M_{on} = \int_0^a \int_0^h (-dF_n + dF_B + dF_B) r \frac{dx dz}{a h}.$$
(17)

Зростання температури повітря внаслідок ударної дії лопатки вентилятора відбудеться відповідно до (11) максимум на $\Delta T \sim 1,7$ К. Таку зміну температури потоку практично можна не враховувати.

За увігнутою стороною лопатки вентилятора утворюється тільки зривна течія, і сама взаємодія з навколишнім середовищем є складним процесом. Зона розрідження за зривною течією заповнюється повітрям у взаємно перпендикулярних напрямках, як це показано на мал. 4 уздовж радіуса обертання і перпендикулярно радіусу обертання з урахуванням лінійної швидкості обертання лопатки. Кут, під яким розповсюджується потік повітря, визначається по (34).

На підставі мал. 4 заповнення зони розрідження відбувається у двох різних областях по-різному. Розділення першої і другої зон залежно від швидкості обертання вентилятора відбувається на відстані x_{kp1} і визначається шляхом розв'язання нелінійного рівняння вигляду:

$$\arctg\left(\frac{b\sqrt{1-(a-x_{kp1})^2/a^2}}{(a-x_{kp1})}\right) = \arctg\left(\frac{c \sin(\alpha + \arctg(b/a))}{r_0 + c \cos(\alpha + \arctg(b/a))}\right) + \arctg\left(\frac{\bar{v} - 2\pi rn}{\bar{v}}\right) - \alpha. \quad (18)$$

Конкретні значення залежно від частоти обертання вентилятора наведені в табл. 1. Отримані значення x_{kp1} для другої області є верхньою межею інтеграції.

У першій області зустрічаються два потоки з взаємно протилежним рухом. В результаті в цій зоні виникає гідродинамічний тиск рівний $0,5\rho\bar{v}^2=0,76$ атм. На зовнішній стороні на виділеному елементі поверхні повітря рухається зі швидкістю

$$v_\tau = 2\pi rn \sin(\gamma + \varphi_0 - \varphi)$$
(19)

і створює гідродинамічний тиск $0,5\rho v_\tau^2$. Різниця цього тиску визначає результуючий момент і відповідно потужність

$$N = \int_{x_{kp1}}^a \pi n \rho (\bar{v}^2 - v_\tau^2) r \frac{\cos(\gamma + \varphi_0 - \varphi)}{\cos(\gamma)} h dx$$
(20)

У другій області молекули повітря бомбардують внутрішню поверхню на відстані x уздовж великої напівосі a під кутом δ'' , який рівний:

$$\delta'' = \beta - \gamma; \quad \delta''' = \beta + \varphi_0 - \varphi - \operatorname{arctg} \left(\frac{b\sqrt{1-x^2/a^2}}{a-x} \right). \quad (21)$$

Нормальна і тангенціальна швидкості удару молекул повітря об увігнуту поверхню лопатки вентилятора визначаються так:

$$v_n = \bar{v} \sin(\delta''); \quad v_\tau = \bar{v} \cos(\delta''). \quad (22)$$

На елемент довжини еліпсоїдної поверхні лопатки dl впливає маса

$$\Delta m = \rho dl dz \bar{v} \sin(\delta'') dt, \quad (23)$$

де $dt = dl / v_\tau = dl / \bar{v} \cos(\delta'')$.

На основі (21) – (23) сили впливу на елемент довжини виражаться так:

$$\begin{aligned} \Delta F_n &= \rho dx dz \bar{v}^2 \frac{\sin^2(\delta'') \cos(\delta''')}{\cos(\gamma)}; \\ \Delta F_B &= \rho dx^2 dz \bar{v}^2 \sin(\delta'') \cos(\delta'') \cos(\delta''') / [\cos^2(\gamma) r_{kp}]; \\ \Delta F_B &= \rho dx dz \bar{v}^2 \cos^2(\delta'') \cos(\delta''') / \cos(\gamma). \end{aligned} \quad (24)$$

Результуюча сила перпендикулярна радіусу обертання

$$F_{pez} = \int_0^{x_{sp}} \int_0^h (\Delta F_n + \Delta F + \Delta F) \frac{dx dz}{ah}, \quad (25)$$

а момент сили:

$$M_{pez2} = \int_0^{x_{sp}} \int_0^h (\Delta F_n + \Delta F + \Delta F) r \frac{dx dz}{ah}. \quad (26)$$

Такому моменту сили відповідає потужність:

$$N_2 = 2\pi n M_{pez2}. \quad (27)$$

Потік повітря, що відкидається вентилятором, охолоне в середньому на:

$$\Delta T = \int_0^{x_{sp}} \frac{\Theta m_a (\bar{v} - 2\pi r n)^2 dx}{2k_B a} \quad (28)$$

Час повного заповнення зони розрідження у зривній течії:

$$t_{зан} = \frac{c \cos(\alpha + \eta)}{\bar{v}}, \quad (29)$$

де кут $\eta = \operatorname{arctg}(b/a)$; $R = \sqrt{[r_0 + c \cos(\alpha + \eta)]^2 + c^2 \sin^2(\alpha + \eta)}$ – радіус поверхні, що омітається лопатками вентилятора і r_0 – радіус кола вентилятора.

За час $t_{зан}$ лопатка вентилятора зміститься на кут

$$\varphi_0 = 2\pi n t_{зан}. \quad (30)$$

Тут n – частота обертання вентилятора.

При заданій швидкості обертання вентилятора за час t лопатка зміститься на кут φ . Якщо кут φ буде менше кута φ_0 , то зривна течія утворюється на певній відстані x від початку лопатки. Ця відстань може бути знайдена шляхом рішення нелінійного рівняння вигляду:

$$\frac{1}{2\pi n} \operatorname{arctg} \left(\frac{c \sin(\alpha + \eta) - c_1 \sin(\alpha + \eta')}{r_0 + c \cos(\alpha + \eta) - c_1 \cos(\alpha + \eta')} \right) = t_{zan}, \quad (31)$$

де $c_1 = \sqrt{x^2 + b^2(1 - x^2/a^2)}$ і $\eta' = \operatorname{arctg}(b\sqrt{1 - x^2/a^2}/(a - x))$.

Виробимо конкретні оцінки для лопаток вентилятора, виконаних з алюмінію у вигляді еліпсоїдної поверхні з розмірами великої напівосі $a = 5$ см, малої напівосі $b = 2$ см і з радіусом кола $r_0 = 5$ см. Радіус поверхні, що омітається, при куті нахилу великої напівосі по відношенню до радіуса обертання $\alpha = 32^\circ$ дорівнює 9,265 см.

Кластер алюмінію є простою кубічною структурою, що складається з семи трьохатомних молекул Al_3 , що відповідає гранецентрованої структурі кристала алюмінію. Тому маса кластера алюмінію рівна $21m_{am_0} = 21 \cdot 26,98 \cdot 1,66 \cdot 10^{-27} = 9,41 \cdot 10^{-24}$ кг (m_a – атомна вага атома алюмінію і m_0 – маса однієї одиниці атомної ваги). При пружному зіткненні молекул повітря з кластером алюмінію частка енергії, що передається, рівна $\Theta = 0,097$.

За опуклою стороною лопатки вентилятора утворюється зона зривної течії. Повністю зона зривної течії утворюється за час, що визначається рівнянням (29). Він дорівнює $9,2 \cdot 10^{-5}$ сек. Цьому часу відповідає критична частота обертання 844 Гц. Щоб за вентилятором утворювалася повністю зривна течія, його лопаті повинні обертатися з надзвуковою швидкістю. При дозвукових швидкостях обертання зривна течія утворюватиметься, але тільки в невеликій області. Ця область визначається шляхом рішення нелінійного рівняння (31). На яких відстанях виникає зривна течія при різних швидкостях обертання представлено в табл. 1

Таблиця 1

Положення точки зриву течії на великій напівосі залежно від частоти обертання

Параметри	Частота обертання, Гц							
	30	50	60	75	100	200	300	400
φ_0 , град.	1,00	1,66	2,00	2,49	3,33	6,65	9,98	13,30
$x_{кр}$, см	0,92	1,01	1,06	1,12	1,23	1,66	2,12	2,63
$x_{крl}$, см	2,95	2,84	2,79	2,70	2,55	1,84	0,97	0

З табл. 1 випливає, що при малих швидкостях обертання зривна течія утворюється поблизу осьової частини лопатки. До точки зриву реалізується ламінарне обтікання. Швидкість руху потоку обумовлена тільки швидкістю обертання вентилятора. При цьому відсутній ударний механізм взаємодії. Реалізуються тільки відцентрові сили і сили, що виникають унаслідок зменшення тиску відповідно до закону Бернуллі. Ці сили на елемент довжини лопатки dl рівні:

$$\Delta F_B = 2\rho\pi^2 r^2 n^2 (R - r)(\varphi_0 - \varphi) dx dz \frac{\cos(\delta)}{\cos(\gamma)} \frac{1}{r_{кр}}; \quad (32)$$

$$\Delta F_B = 2\rho\pi^2 r^2 n^2 (R - r)(\varphi_0 - \varphi) dx dz \frac{\cos(\delta)}{\cos(\gamma)}$$

де r – радіус обертання точки x на великій напівосі a , φ_0 – кут, що перекривається лопаткою по дузі поверхні, що омітається кут $\delta = \alpha + \varphi_0 - \varphi$. Ці сили створюють обертаючий момент, протилежний напрямку обертання вентилятора, який рівний:

$$M = \int_{x_{кр}}^a -(\Delta F_B + \Delta F_B) r \frac{dx}{a}. \quad (33)$$

Розрідження, що утворюється, в зривній течії заповнюється повітрям у взаємно перпендикулярних напрямках, як це показано на рис. 4 уздовж радіуса обертання і перпендикулярно радіусу обертання з урахуванням лінійної швидкості обертання лопатки.

Кут, під яким розповсюджується потік повітря, рівний:

$$\beta = \arctg\left(\frac{\bar{v} - 2\pi rn}{\bar{v}}\right) \quad (34)$$

Молекули повітря бомбардують зовнішню поверхню на відстані x уздовж великої напівосі a під кутом δ , який рівний:

$$\delta = \pi/2 - \delta'; \quad \delta' = (\alpha + \beta - \varphi). \quad (35)$$

Нормальна і тангенціальна швидкості удару молекул повітря об увігнуту поверхню лопатки вентилятора рівні:

$$v_n = \bar{v} \sin(\delta'); \quad v_\tau = \bar{v} \cos(\delta'). \quad (36)$$

На елемент довжини еліпсоїдної поверхні лопатки dl впливає маса

$$\Delta m = \rho dl dz \bar{v} \cos(\delta') dt, \quad (37)$$

де $dt = dl / v_\tau = dl / \bar{v} \cos(\delta')$.

На основі (34) – (37) сили впливу на елемент довжини матимуть таке вираження:

$$\begin{aligned} \Delta F_n &= \rho dx dz \bar{v}^2 \frac{\sin(\delta') \cos^2(\delta')}{\cos(\gamma)}; \\ \Delta F_B &= \rho dx^2 dz \bar{v}^2 \sin^2(\delta') \cos(\delta') / [\cos^2(\gamma) r_{kp}]; \\ \Delta F_B &= \rho dx dz \bar{v}^2 \sin^3(\delta') / \cos(\gamma). \end{aligned} \quad (38)$$

Результуюча сила перпендикулярна радіусу обертання

$$F_{pez} = \int_0^{x_{sp}} \int_0^h (\Delta F_n - \Delta F - \Delta F) \frac{dx dz}{ah}, \quad (39)$$

а момент сили:

$$M_{pez1} = \int_0^{x_{sp}} \int_0^h (\Delta F_n - \Delta F - \Delta F) r \frac{dx dz}{ah} \quad (40)$$

Потужність, що використовується вентилятором у відповідності з (40) дорівнює:

$$N_1 = 2\pi n M_{pez1}. \quad (41)$$

Потужність, що споживається вентилятором, від частоти обертання відповідно до загального визначення повинна залежати пропорційно третій степені частоти обертання. Реально ця залежність пропорційна приблизно $3/2$, і із зростанням швидкості обертання зменшується і переходить в лінійну залежність. Це результат дії багатьох сил на лопаті вентилятора, які виникають унаслідок взаємодії їх з навколишньою атмосферою. Із зростанням числа ступенів вентилятора потужність споживання трохи зменшується.

Вентилятор відкидає повітря перпендикулярно площині свого обертання. Кожна лопать вентилятора формує швидкість потоку повітря:

$$\dot{Q} = \int_0^a (\bar{v} - 2\pi rn)(1 - \sqrt{\Theta}) \frac{dx}{a}. \quad (42)$$

Із зростанням швидкості обертання швидкість потоку, який відкидається зменшується майже по лінійному закону. Максимальна швидкість потоку, який відкидається виникає при малих швидкостях обертання вентилятора, тому системи, що працюють у режимі вентилятора, функціонують при малих швидкостях їх обертання. Якщо використовувати такі системи як вихровий тепловий насос, то ефективність їх застосування

$$\eta = \frac{\dot{Q}^3 + 2\dot{Q}R_g\Delta T / m_a}{\bar{v}^3} \quad (43)$$

Тут $R_g = 8,3144$ Дж/моль·К – універсальна газова постійна.

При швидкості обертання 10 Гц коефіцієнт перетворення складає 2,10%, а при 100 Гц – це 1,36%. При таких коефіцієнтах перетворення вентилятор використовувати як тепловий насос не доцільно. Тому вентилятори в автомобільному транспорті широко використовуються для охолодження корпусу працюючого двигуна внутрішнього згорання.

Висновки

Розроблена загальна схема роботи вентилятора і обґрунтовано, яким чином визначається коефіцієнт перетворення такої відкритої енергосистеми. З'ясовані, які типи взаємодії виникають у процесі формування вентилятором повітряного потоку. Визначені умови, при яких вентилятор переходить в режим роботи теплового насоса. Створені алгоритм і програмне забезпечення для комп'ютерного моделювання роботи вентилятора як теплового насоса.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Гречихин Л. И. Аэродинамика малоразмерного БЛА / Л. И. Гречихин, Д. А. Сахарук, А. Б. Сивашко // Proceedings 4th International Conference on SAUAV-2010. – 2010. – Р. 39.
2. Гацукевич А. С. Работа турбин в качестве теплового насоса // А. С. Гацукевич, Л. И. Гречихин Гражданская авиация XXI век: Сб. материалов 1 Международной молодежной научной конференции 23 – 24 апреля 2009 г. – Ульяновск: УВАУ ГА – 2009 – С. 9 – 10.
3. Гречихин Л. И. Современная энергетика. Пути и методы развития и применение на транспорте / Л. И. Гречихин, Куць Н. // Наукові нотатки. – 2010. – Вып. 28 (май 2010) – С. 162 – 165.
4. Гречихин Л. И. Получение и преобразование энергии в открытых системах / Л. И. Гречихин // Энергетика. – 2004. – № 4. – С. 76 – 81.
5. Плешивцев Н. В. Физика воздействия ионных пучков на материалы / Н. В. Плешивцев, А. И. Бажин – М.: Вузовская книга, 1998. – 392 с.
6. Стасенко А. Л. Физические основы полета / А. Л. Стасенко – М.: Бюро квантум, 2005. – 256 с.

Куць Надія Григорівна – к. т. н., доцент кафедри «Автомобілі і автомобільне господарство», тел. моб. – 0660821228, e-mail – Kuts_n@mail.ru.

Луцький національний технічний університет.