

## ТЕОРІЯ РОБОТИ ВЕНТИЛЯТОРА ЯК ВІДКРИТОЇ МЕХАНІЧНОЇ СИСТЕМИ З ВИКОРИСТАННЯМ НА АВТОМОБІЛЬНОМУ ТРАНСПОРТІ

*Створено молекулярно-кінетичну теорію роботи вентилятора як відкритої системи. Показано, в яких умовах вентилятор може працювати як тепловий насос. З аналізу загальної схеми роботи вентилятора визначено коефіцієнт перетворення такої відкритої енергосистеми.*

**Вступ. Постановка проблеми.** У процесі взаємодії рухомого транспортного засобу з навколишньою атмосферою може відбуватися або передача енергії від рухомого об'єкта в навколишнє середовище, або навпаки — середовище передає свою енергію об'єкту, що рухається. У першому випадку середовище є пасивним, а в другому випадку, навпаки – активним. Активна складова навколишнього середовища використовується у вітроенергетиці, гідроелектростанціях, сонячних перетворювачах. Це природні джерела активної складової навколишньої атмосфери.

Реалізувати активну складову навколишнього середовища можна штучним чином. Навколишнє середовище насичене тепловою, електричною та електромагнітною енергіями досить великої величини. Якщо організувати кругообіг цієї енергії з високим коефіцієнтом перетворення, то можна одержати екологічно чистий приріст енергії і використовувати цей приріст у всіх сферах енергоспоживання. Мова йде про теплові насоси.

**Аналіз останніх досліджень.** У сучасній енергетиці виникла ситуація, коли почалися інтенсивні пошуки нових способів отримання і перетворення енергії [3]. Великого значення набуває розробка умов створення комплексованих енергосистем. Особливо коли мова йде про використання теплових насосів спільно з іншими перетворювачами енергії.

Прикладом може бути авіаційний повітряний гвинт як тепловий насос [1] і робота турбін у турбореактивних двигунах [2]. Під час руху автомобіля виникає його взаємодія з навколишнім повітряним середовищем і важливу роль у цьому процесі виконує вентилятор як тепловий насос.

Тепловий насос здійснює перекачування енергії від однієї енергосистеми до іншої. Щоб така передача енергії відбувалася, необхідно від третього незалежного джерела енергії використовувати певну енергію і подолати енергію активації. Від незалежного джерела енергії працює тепловий насос, який відбирає енергію від джерела і передає її до споживача. Якщо система замкнута, то для такої системи застосовується закон збереження енергії.

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, яка використовується для охолодження різних нагрівальних елементів у складних енергосистемах.

Якщо розглядати окремих елемент поверхні  $dS$  вентилятора, який відносно повітряного потоку спрямований під кутом  $\alpha$  і рухається зі швидкістю  $v$ , то за час  $dt$  взаємодіюча маса повітря складе:

$$\Delta m = \rho v dt \cos(\alpha) dS, \quad (1)$$

а зміна швидкості:

$$\Delta v = 2v \cos(\alpha). \quad (2)$$

На основі (1) і (2) сила тиску повітряного потоку на досліджуваний елемент поверхні  $dS$  згідно з другим законом Ньютона визначиться так:

$$\Delta F = 2\rho v^2 \cos^2(\alpha) dS. \quad (3)$$

Загальна сила взаємодії:

$$F = 2\rho v^2 \int_S \cos^2(\alpha) dS = 2C_x \rho v^2, \quad (4)$$

де  $C_x$  – коефіцієнт, який визначається розмірами і формою рухомого транспортного засобу.

Витрачена потужність енергосилової установки транспортного засобу на подолання такої сили дорівнює:

$$N = 2C_x \rho v^3. \quad (5)$$

Отже, автомобіль, що рухається, з навколишнім повітрям взаємодіє істотним чином. Тому не тільки автомобіль, але й будь-який інший транспортний засіб, що рухається в земній атмосфері, слід розглядати як складну енергосистему відкритого типу. Якщо такою взаємодією можна знехтувати, то тоді транспортний засіб, що рухається, слід розглядати як замкнуту систему. Для закритих систем справедливий

механічні закони збереження, а для відкритих систем закони збереження не використовуються, а використовується закон перетворення енергії, який було чітко сформульовано М.Ломоносовим.

**Мета дослідження:** з'ясувати принцип роботи вентилятора й те, в яких умовах він може працювати як тепловий насос. Розробити загальну схему роботи вентилятора та обґрунтувати, яким чином визначається коефіцієнт перетворення такої відкритої енергосистеми.

**Основна частина.** Вентилятор – це пристрій для створення потоку повітря в заданому напрямку. Загальний принцип роботи вентилятора наведено на рисунку 1:

- а) при ламінарному обтіканні;
- б) при виникненні зривної течії.

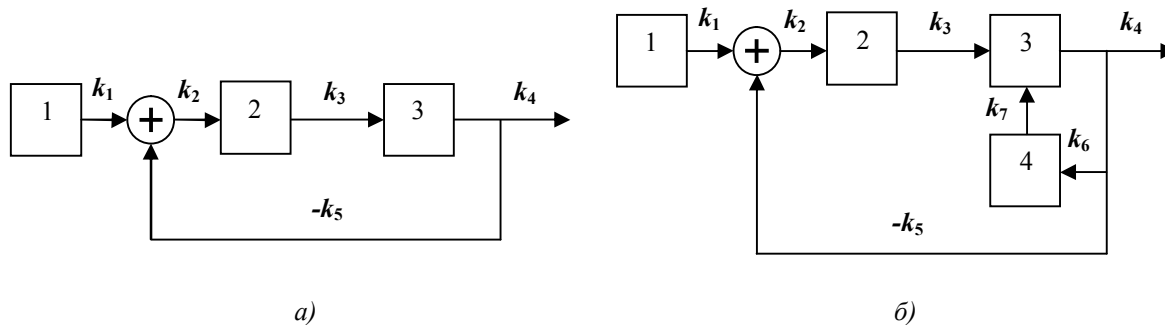


Рис. 1. Загальна схема роботи вентилятора:  
а) при ламінарному обтіканні; б) при зривній течії

При ламінарному обтіканні лопаток вентилятора витрачається робота на створення потоку повітря і подолання сил тертя. Взаємодія з навколишнім середовищем не призводить до зміни внутрішньої енергії обтічного повітря. Тому енергія, яку споживає вентилятор від третього джерела енергії, витрачається переважно на створення руху повітря в заданому напрямку. Якщо джерело містить кількість енергії  $Q$ , то потужність, що віддається джерелом, подається лінійним оператором  $k_1$  і становить  $k_1 \dot{Q}$ . Ця енергія надходить у суматор, до якого подається потужність, обумовлена роботою дисипативних сил шляхом організації негативного зворотного зв'язку. Після суматора результуюча потужність подається у двигун. Лінійний оператор передачі енергії при цьому реалізується  $k_2$ . Двигун обертає лопатки вентилятора, які формують потік повітря. Лінійний оператор передачі потужності від двигуна до лопаток вентилятора –  $k_3$ , а від лопаток до потоку повітря –  $k_4$ . Відповідно до введених операторів закон перетворення енергії запишеться так:

$$(k_1 - k_5 k_2 k_3) \dot{Q} = k_2 k_3 k_4 \dot{Q} \tag{6}$$

Якщо (6) розділити на потужність, споживану від джерела, то отримаємо:

$$\hat{E} = 1 - \frac{k_5 k_2 k_3}{k_1}, \tag{7}$$

де  $K$  – коефіцієнт перетворення споживаної потужності до повітряного потоку, а відношення  $k_5 k_2 k_3 / k_1$  слід розглядати як коефіцієнт втрат на подолання дисипативних сил. Відповідно до (7) коефіцієнт перетворення завжди менший від одиниці, і тому його слід розглядати як коефіцієнт корисної дії.

При збільшенні швидкості обертання виникає зривна течія, за якою утворюється зона розрідження. Тиск у зоні розрідження за зривною течією з урахуванням закону Бернуллі:

$$D = P_0 \exp\left(-\frac{m_a v_l^2}{2k_A \dot{Q}}\right), \tag{8}$$

де  $P_0$  – тиск навколишнього середовища;  $m_a$  – середня маса часток повітря;  $k_B$  – постійна Больцмана;  $T$  – температура навколишнього повітря;  $v_l$  – швидкість руху потоку повітря вздовж поверхні лопатки.

При заповненні зони розрідження виникає відтік енергії з навколишнього середовища до лопаток вентилятора. Навколишнє середовище в цьому випадку являє собою додаткове джерело енергії. Загальна схема роботи вентилятора в цьому випадку наведена на рисунку 1, б. Закон перетворення енергії для схеми (рис. 1, б) має вигляд:

$$k_1 \dot{Q} + k_6 k_7 \dot{Q}_1 = k_4 (k_2 k_3 \dot{Q} + k_6 k_7 \dot{Q}_1) + k_5 (k_2 k_3 \dot{Q} + k_6 k_7 \dot{Q}_1 + k_6 (k_2 k_3 \dot{Q} + k_6 k_7 \dot{Q}_1)) \tag{9}$$

де  $\dot{Q}_1$  – значення максимальної потужності передачі енергії за одиницю часу від навколишнього середовища до лопаток вентилятора;  $k_6$  – лінійний оператор порушення активної складової навколишнього середовища;  $k_7$  – лінійний оператор передачі потужності до лопаток вентилятора.

Споживання енергії контролюється тільки для джерела 1. Контроль надходження енергії від джерела 4 здійснюється за значенням коефіцієнта перетворення, що дорівнює:

$$\hat{E} = \frac{k_4(k_2k_3\dot{Q} + k_6k_7\dot{Q}_1)}{k_1\dot{Q}} = K_0 + \frac{k_4k_6k_7}{k_1} \frac{\dot{Q}_1}{\dot{Q}}, \quad (10)$$

де  $K_0$  – коефіцієнт перетворення при ламінарному обтіканні лопаток вентилятора.

Оператори перетворення енергії можуть бути знайдені шляхом з'ясування механізму різних взаємодій навколишнього повітря з лопатками вентилятора.

Важливо визначити, під яким кутом слід розташовувати лопатки вентилятора, щоб забезпечити охолодження повітря всієї взаємодіючої площини лопатки, та коли таке охолодження буде створювати максимальне збільшення моменту на валу обертання вентилятора. Для цього визначимо умови розташування лопаток щодо осі обертання вентилятора шляхом розрахунку моментів сил, що виникають унаслідок взаємодії з лопаткою вентилятора.

При ударі молекул повітря в опуклу поверхню лопатки виникає гальмуючий момент. Тангенціальний рух повітря, що виникає при цьому, визначає утворення відцентрових прискорень і дію закону Бернуллі, моменти сил яких протилежні ударному механізму. Отже, умова, за якої повітря буде охолоджуватися і при цьому момент на валу вентилятора буде зростати, для зовнішньої поверхні лопатки запишеться так:

$$\chi = \frac{\Delta F_{\text{оа}}}{\Delta F_{\text{о}} + \Delta F_{\text{і}}} \leq 1. \quad (11)$$

Тут ударну дію  $\Delta F_{\text{уд}}$  визначено (8). Відцентрове прискорення визначає силу:

$$\Delta F_{\text{о}} = \Delta m \frac{\Delta v_{\tau}^2}{R} = \rho dl dS \sin(\alpha) \cos(\alpha) \frac{v_B^2}{b}, \quad (12)$$

де  $dl = \sqrt{dx^2 + dy^2}$  – елемент дуги еліпсоїдальної поверхні;  $R$  – радіус кривизни розглянутого елемента дуги, який біля основи лопатки  $R = b$ ;  $v_B$  – лінійна швидкість елемента лопатки на віддалені  $r$  від осі обертання.

Із закону Бернуллі отримуємо гідродинамічну силу впливу потоку повітря на лопатку вентилятора:

$$\Delta F_{\text{і}} = \frac{\rho v_{\tau}^2}{2} dS = 0,5 \rho \bar{v}^2 \sin^2(\alpha) dS. \quad (13)$$

Рівняння (12) можна вважати нескінченно малою величиною другого порядку, порівняно з (8) і (13). Тому умова (9) остаточно набуде вигляду:

$$\chi = \text{ctg}^2(\alpha) \leq 1. \quad (14)$$

На основі (14) одержуємо, що лопатки еліпсоїдальної форми вентилятора слід розташовувати під кутом менше  $45^\circ$ . При такому розташуванні лопаток вентилятора останні будуть виконувати роль вихрового теплового насоса.

Коли лопатки вентилятора рухаються своєю увігнутою стороною, то вони ніби захоплюють потік повітря. Впливаючи на кожну молекулу повітря, відбувається збільшення її швидкості, і тим самим відбувається зростання ентальпії потоку повітря, що відкидається лопаткою. Повітря по опуклій стороні лопатки може здійснювати одночасно рух як у ламінарному режимі, так і шляхом утворення зривної течії. При ламінарному обтіканні ентальпія потоку повітря не змінюється, а при зривній течії виникає зона розрідження. Ця зона заповнюється повітрям навколишньої атмосфери зі швидкістю звуку. Удари молекул повітря по опуклій стороні лопатки віддають частину своєї кінетичної енергії самій лопатці, і при цьому відбувається зменшення ентальпії впливу потоку повітря. Повітря охолоджується, а його потік призводить до формування відцентрового і, внаслідок закону Бернуллі, відтоку повітря від опуклої поверхні протилежно обертанню вентилятора. На це витрачається робота за рахунок додаткового споживання енергії від джерела. За вентилятором потоки повітря від увігнутої та опуклої поверхонь лопатки змішуються, і практично ентальпія результуючого потоку повітря істотно не змінюється.

Коли обтікання повітря по опуклій стороні лопаток здійснюється в області зривної течії, то в цьому випадку момент сили, обумовлений ударною дією молекул повітря, сприяє обертанню вентилятора, а відцентрові сили й сили, внаслідок дії закону Бернуллі, навпаки, перешкоджають обертанню вентилятора. Залежно від співвідношення цих сил відбувається як збільшення споживання енергії від джерела, так і зменшення такого споживання. Це сприяє або більшому, або меншому споживанню енергії від джерела при заданій швидкості обертання. Основне споживання енергії від джерела реалізується за

рахунок роботи, що витрачається на створення потоку повітря перед лопаткою вентилятора та на збільшення ентальпії цього потоку. Ентальпія потоку повітря за вентилятором різко зменшується внаслідок адіабатичного розширення при заповненні області за зривною течією і на зменшення кінетичної енергії кожної молекули повітря після пружного удару по увігнутій поверхні лопатки. Тому за вентилятором результуюча ентальпія істотно не змінюється. Проте при цьому важливо оцінити умови, коли виникає зривна течія.

При обертанні в напрямку до увігнутої поверхні сила ударної взаємодії в області зривної течії спрямована вздовж напрямку руху. В міру зростання частоти обертання ця сила збільшується, і потужність, споживана вентилятором, прагне до лінійної залежності від частоти обертання. При цьому зміна температури потоку, що відкидається вентилятором, зменшується.

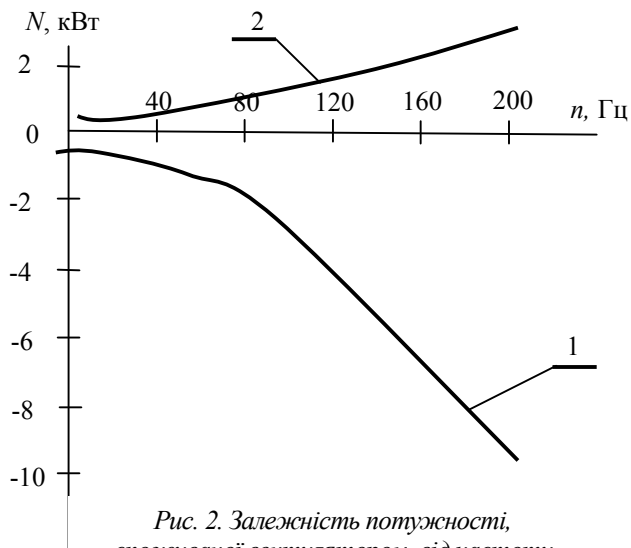


Рис. 2. Залежність потужності, споживаної вентилятором, від частоти обертання: 1 – рух увігнутою поверхнею; 2 – рух опуклою поверхнею

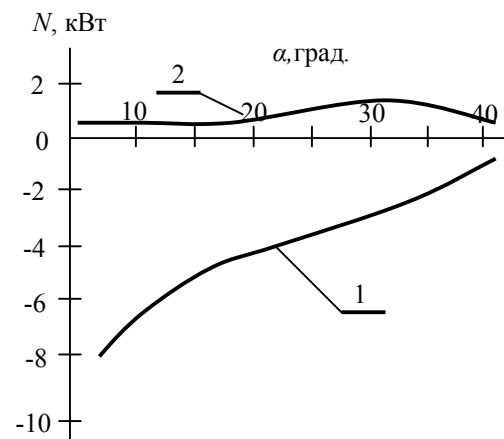


Рис. 3. Залежність потужності, споживаної вентилятором, від кута установки лопаток при частоті обертання 75 Гц: 1 – рух увігнутою поверхнею; 2 – рухи опуклою поверхнею

На рисунку 3 наведено залежність потужності, споживаної вентилятором, при частоті обертання 75 Гц залежно від кута установки лопаток вентилятора. Зменшення потужності обумовлено тим, що при зростанні кута установки лопаток відносно осі обертання відбувається зменшення площі взаємодії з навколишньою атмосферою. При установці лопаток понад  $40^\circ$  вентилятор генерує потік, протилежний обертанню, і припиняє створювати потік повітря в напрямку обертання. У разі обертання вентилятора в напрямку до опуклої поверхні тільки одна сила перешкоджає руху, а всі інші сили, що виникають внаслідок обертання вентилятора, спрямовані в напрямку обертання. Тому енергоспоживання при заданій швидкості обертання різко зменшується, і особливо при зростанні швидкості обертання вентилятора.

Залежно від частоти обертання охолодження потоку повітря за вентилятором представлено на рисунку 4. Зі зростанням частоти обертання температура охолодження потоку повітря за вентилятором практично падає за лінійним законом. Коли температура навколишнього повітря одноступінчатого вентилятора буде менше 294 К, то його корпус почне охолоджуватися настільки, що виникне заледеніння. Для двоступінчатого вентилятора охолодження повітря відбудеться на 34,5 К, а для треступінчатого – на 48,4 К. Отже, при роботі багатоступінчатого вентилятора відбудеться його істотне охолодження. Під час проведення випробування вентилятора на стенді дійсно спостерігалось інтенсивне заледеніння кока [6].

Охолоджений потік є джерелом відсмоктування теплової енергії з навколишнього середовища, і витрачається ця енергія на створення механічної роботи, яка при великих швидкостях обертання вентилятора може повністю перетворювати теплову енергію на роботу. Так працює тепловий насос. Отже, працюючий вентилятор можна трактувати як діючий вихровий тепловий насос.

Коли використовується багатоступінчаста система обертових лопаток, то тоді це звичайний компресор. У компресорах потоком повітря керують соплові апарати. Такі системи вимагають свого підходу й виходять за рамки розгляду вентилятора. Якщо не використовувати соплових апаратів, то подальший ступінь перешкоджає роботі попереднього ступеня. Система стає неефективною. Експериментально це відомі факти, але вимагають, з позицій молекулярно-кінетичної теорії, детального розгляду.

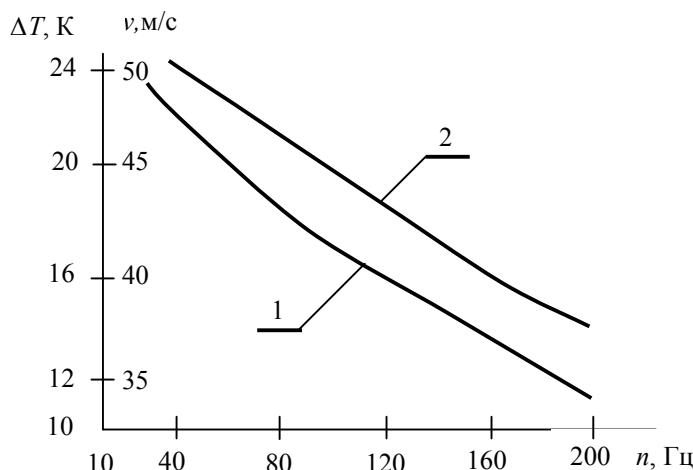


Рис. 4. Залежність від швидкості одноступінчатого вентилятора в напрямку опуклого боку обертання: 1 – зміни температури; 2 – швидкості обертання потоку повітря, що викидається

**Висновки.** На основі застосування молекулярно-кінетичної теорії встановлено принцип роботи вентилятора та визначено умови, коли він може працювати як тепловий насос. Розроблено загальну схему роботи вентилятора та обґрунтовано, яким чином визначається коефіцієнт перетворення такої відкритої енергосистеми. З'ясовано, які типи взаємодії виникають у процесі формування вентилятором повітряного потоку. Показано, що вентилятор може бути ефективно використаний в основному для охолодження високотемпературних енергетичних агрегатів.

#### ЛІТЕРАТУРА:

1. Гречихин Л.І. Аеродинаміка малорозмірних БЛА / Л.І. Гречихин, Д.А. Сахарук, А.Б. Сівашко // Proceedings 4-th International Conference on SAUAV-2010. – Р. 39.
2. Гацукевіч А.С. Робота турбін в якості теплового насоса / А.С. Гацукевіч, Л.І. Гречихин // Цивільна авіація XXI століття : зб. матеріалів I міжнар. молодіжної наук. конф. 23–24 квітня 2009. – Ульяновськ : УВАУ ГА, 2009. – С. 9–10.
3. Гречихин Л.І. Сучасна енергетика. Шляхи та методи розвитку і застосування на транспорті / Л.І. Гречихин, Н.Г. Куць // Наукові нотатки. – 2010. – Вип. 28 (травень 2010). – С. 162–165.
4. Гречихин Л.І. Отримання і перетворення енергії у відкритих системах / Л.І. Гречихин // Енергетика. – 2004. – № 4. – С. 76–81.
5. Плешивцев Н.В. Фізика впливу іонних пучків на матеріали / Н.В. Плешивцев, А.І. Бажин. – М. : Вузівська книга, 1998. – 392 с.
6. Стасенко А.Л. Фізичні основи польоту / А.Л. Стасенко. – М. : Бюро Квантум, 2005. – 256 с.

КУЦЬ Надія Григорівна – кандидат технічних наук, доцент кафедри «Автомобілі та автомобільне господарство» Луцького національного технічного університету.

Наукові інтереси:

– удосконалення дорожніх транспортних засобів і двигунів до них.

Тел. (моб.): 0660821228.

E-mail: Kuts\_n@mail.ru

Подано 20.05.2010

**Куць Н.Г.** Теорія роботи вентилятора як відкритої механічної системи з використанням на автомобільному транспорті

**Куць Н.Г.** Теория работы вентилятора, как открытой механической системы с использованием на автомобильном транспорте

**Kuts N.G.** Theory of the work of fan as the open mechanical system with the use in the truck transport

УДК 621.436.004.5

**Теория работы вентилятора, как открытой механической системы с использованием на автомобильном транспорте / Н.Г. Куць**

Создана молекулярно-кинетическая теория работы вентилятора, как открытой системы. Показано, в каких условиях вентилятор может работать как тепловой насос. Из анализа общей схемы работы вентилятора определен коэффициент преобразования такой открытой энергосистемы.

УДК 621.356.004.5

**Theory of the work of fan as the open mechanical system with the use in the truck transport / N.G. Kuts**

Create a molecular-kinetic theory of the fan, as an open system. We show the conditions in which the fan can operate the heat pump. From the analysis of the general scheme defined fan conversion factor of such an open grid.