

експериментальних досліджень, отримано нове рішення актуальної наукової проблеми встановлення закономірностей тепломасообмінних процесів, що протікають в повітроохолоджувачі ВКС-658, за рахунок визначення залежності інтенсивності тепломасообміну та стійкості гідродинаміки суміші повітря-вода в апаратах контактної системи охолодження турбокомпресора типу «труба Вентурі – сепаратор краплинної вологи», що шляхом застосування розробленої на цій основі принципово нової системи охолодження забезпечує стабільне постачання обладнання стисненим повітрям і має велике значення для енергетичної промисловості. Встановлено, що швидкість повітря в горловині повітроохолоджувача визначає температуру середовища на виході з апарату та кінцевий вологовміст повітря.

Список літератури

1. **Гончаров А.В.** Мероприятия по повышению охлаждающей способности башенных и вентиляторных градирен в системах технического водоснабжения / **А.В. Гончаров**, Энергетик. – 2003. – № 3. – С. 18-19.
2. **Бобров А. И.** Пути улучшения пылевой обстановки в горных выработках на основе управления пылевоздушными потоками / **А. И. Бобров, А. П. Корнев** // Безопасность труда в промышленности. – 1996. – №1. – С. 18–22.
3. **Буров А.А.** Центробежная очистка промышленных выбросов в атмосферу / **Буров А.А., Буров А.И., Силин А.В., Цабиев О.Н.** // Экология докільля та безпека життєдіяльності. – 2005. – № 6. – С. 44 – 51.
4. **Басманов П.И.** Высокоэффективная очистка аэрозолей фильтрами Петрянова / **П.И. Басманов, В.И. Кириченко, Ю.Н. Филагов, Ю.Л. Юров** – М., 2002. – 193 с.
5. **Мурзин В. А.** Рудничные пневматические установки // **В. А. Мурзин, Ю.А. Цейтлин** // М.: Недра, 1965.–312 с.
6. **Пономаренко В.С.** Вопросы модернизации градирен / **В.С. Пономаренко** // Водоснабжение и санитарная техника. – 1995. – № 8. – С. 11–13.
7. **Сосновский С.К.** Определение эффективности охлаждения циркуляционной воды в вентиляторы и башенных градирнях / **С.К. Сосновский, В.П. Кравченко** // Энергетика та електрифікація. – 2008. – №3. – С. 37 – 41.
8. **Сосновский С.К.** Пути повышения эффективности работы вентиляторных и башенных градирен / **С.К. Сосновский, В.П. Кравченко** // Холодильна техніка і технологія. – 2013. – №4 (144). – С. 51 – 60.
9. **Лаптев А.Г.** Устройство и расчет промышленных градирен: Монография / **А.Г. Лаптев, И.А. Ведьгаева** // Казань: КГЭУ, 2004. – 180 с.
10. **Сахновский В.И.** Исследование способов снижения температуры рудничного воздуха в переходной период / **В.И. Сахновский, П.В. Дмитриичук, В.М. Куроченко, А.Р. Микитенко** // Снижение уровня вредных производственных факторов на горнорудных предприятиях (ВНШБТГ). – М., 1986. – С. 23–27.
11. **Лапшин А.А.** Снижение температуры воздуха в тупиковых выработках шахт путем охлаждения вентиляционной струи в забоях / **А.А. Лапшин** // Уголь Украины, - 2010. – №2 – С. 130-135.
12. **Басов Ю.Ф.** Распылительные системы охлаждения циклового воздуха газотурбинного привода и их эффективность / **Ю.Ф. Басов, П.Д. Жеманюк, И.И. Петухов [и др.]** // Авиационно-космическая техника и технология. – 2009. – № 7(64). – С. 38-43.
13. **Рис В. Ф.** Центробежные компрессорные машины / **В.Ф. Рис** // М. – Л.: Машгиз, 951.–245 с.
14. **Мурзин В.А.** Рудничные пневматические установки // **В.А. Мурзин, Ю.А. Цейтлин** // М.: Недра, 1965.–312 с.
15. **Трегубов В.А.** Выбор конструктивных параметров контактных воздухоохладителей шахтных турбокомпрессоров / **В.А. Трегубов, Замыцкий О.В., Б.М. Литовко** // Збірник наукових праць Науково-дослідного гірничорудного інституту Державного вищого навчального закладу «Криворізький національний університет». – Кривий Ріг, НДГРІ ДВНЗ «КНУ», 2014-2015. – №55 – 316 с.

Рукопис подано до редакції 06.11.2017

УДК 530

О.А. ГУЛІВЕЦЬ, канд. техн. наук, доц., С.Ю. ОЛІЙНИК, асистент, Р.А. ІЛЬЧЕНКО, студент
Криворізький національний університет

КРИТЕРІЇ ПОДІБНОСТІ АЕРОДИНАМІЧНИХ ПРОЦЕСІВ ВІТРОДВИГУНІВ

Мета. Установити критерії подібності процесу обтікання вітровим потоком лопатей роторів вітродвигунів та на їх основі одержати залежності для визначення раціональних значень параметрів роторів вітродвигунів і їх робочих характеристик за результатами досліджень їх фізичних моделей.

Методи дослідження. Метод дослідження – аналітичний.

Наукова новизна. Установлені критерії подібності процесу обтікання вітровим потоком лопатей роторів вітродвигунів і на основі визначені залежності для визначення параметрів роторів вітродвигунів і їх робочих характеристик за результатами досліджень їх фізичних моделей.

Практична значимість. На основі установлених критеріїв подібності робочих процесів горизонтально-осьових та вертикально-осьових вітродвигунів розроблені залежності для визначення значень параметрів натурних зразків

вітродвигунів за результатами досліджень їх фізичних моделей, що дозволяє прискорити процес створення високоефективних вітроелектричних установок малої потужності.

Результати. На основі аналізу процесів обтікання вітровим потоком лопатей горизонтально-осьового та вертикально-осьового ВД установлено, що потужність, яка є основною експлуатаційною характеристикою, залежить від ряду параметрів вітрового потоку та параметрів роторів ВД: швидкості навігаючого потоку, густини повітря, коефіцієнта кінематичної в'язкості, аеродинамічних коефіцієнтів сил, які виникають при обтіканні вітровим потоком лопатей та траверсу роторів ВД, діаметрів роторів, довжини та хорди лопатей, кута установки лопаті, кута атаки, площі лопаті, площі обмаху ротора, кількості лопатей, кутової швидкості ротора, шорсткості обробки поверхонь лопатей. Пускова швидкість ВЕУ, від якої залежить кількість електричної енергії, яку виробляє установка за рік, крім названих параметрів залежить ще і від моменту інерції ротора ВД та моменту інерції ротора електричного генератора. На основі одержаних у загальному виді залежностей потужності і пускової швидкості горизонтально-осьових та вертикально-осьових вітродвигунів від параметрів вітрового потоку і параметрів роторів вітродвигунів, застосувавши метод нульових розмірностей установлені критерії подібності їх робочих процесів. На основі установлених критеріїв подібності одержані залежності для визначення параметрів роторів натурних зразків вітродвигунів за результатами досліджень їх фізичних моделей. На основі аналізу одержаних залежностей розроблені висновки щодо визначення раціональних значень параметрів натурних зразків і параметрів їх фізичних моделей.

Ключові слова: вітроелектрична установка, вітродвигун, лопать, аеродинаміка, фізичне моделювання, критерії подібності.

doi: 10.31721/2306-5451-2018-1-46-90-95

Проблема та її зв'язок з науковими та практичними завданнями. Енергетичну проблему України в певній мірі можна вирішувати шляхом виконання автономних вітроелектричних установок (ВЕУ) малої потужності. Створення високоефективних вітродвигунів (ВД) ВЕУ малої потужності для кліматичних умов України (середньорічна швидкість вітру 4,5 а в поривах 36 м/с) вимагає виконання ряду теоретичних та експериментальних досліджень для вибору раціональних конструкцій роторів ВД та оптимальних значень їх параметрів.

Аналіз досліджень і публікацій. Фізичному моделюванню процесів обдування вітровим потоком різних тіл присвячено ряд робіт, основна частина яких стосується аеродинаміки крил та гвинтів літальних апаратів [1-6]. Аеродинаміка лопатей ВД в значній мірі має схожість з аеродинамікою крил та повітряних гвинтів але має і відмінності. Тому є доцільним при виборі параметрів ВД виконати фізичне моделювання.

Постановка задачі. На основі установлених в загальному виді залежностей потужності та пускової швидкості ВД від параметрів вітрового потоку і параметрів їх роторів [8] установити критерії подібності робочих процесів та залежності для визначення параметрів натурних зразків за результатами досліджень їх фізичних моделей.

Викладення матеріалу та результати. Найбільш загальним способом визначення критеріїв подібності є метод нульових розмірностей [7], що ґрунтується на П-теоремі подібності, який дозволяє визначити критерії подібності без необхідності використання рівнянь, які описують процес, що виконується даною технічною системою. Для цього необхідно лише знати, якими вихідними параметрами характеризується функціонування системи і які параметри системи впливають на них.

На основі аналізу процесів обтікання вітровим потоком лопатей горизонтально-осьового та вертикально-осьового ВД установлено, що потужність P_P на валу ротора ВД і значення пускової швидкості вітру v_n , які є основними експлуатаційними характеристиками ВД ВЕУ є функціями фізичних параметрів вітру, типу і параметрів роторів ВЕУ:

$$P_{P_2} = f_1(v, \rho, \nu, C_y, C_x, C_z, D, l, b, \beta, \alpha, S_A, S_P, n, \omega, R_z); \quad (1)$$

$$P_{P_6} = f_2(v, \rho, \nu, C_y, C_x, C_z, C_q, C_{xT}, D, l, b, \beta, \alpha, S_A, S_P, n, \omega, R_z); \quad (2)$$

$$v_{n_2} = f_3(v, \rho, \nu, C_y, C_x, C_z, D, l, b, \beta, \alpha, S_A, S_P, n, R_z, I_P, I_2); \quad (3)$$

$$v_{n_6} = f_4(v, \rho, \nu, C_y, C_x, C_z, C_q, C_{xT}, D, l, b, \beta, \alpha, S_A, S_P, n, R_z, I_P, I_2), \quad (4)$$

де P_{P_2} , P_{P_6} – потужність на валу відповідно горизонтально-осьового та вертикально-осьового роторів, $\text{кг} \cdot \text{м}^2/\text{с}^3$; v – швидкість навігаючого вітрового потоку, $\text{м}/\text{с}$; ρ – густина повітря, $\text{кг}/\text{м}^3$; ν – коефіцієнт кінематичної в'язкості повітря, $\text{м}^2/\text{с}$; C_y , C_x , C_z – аеродинамічні коефіцієнти відповідно підйомної сили, лобового тиску та бічної сили при обтіканні вітровим потоком аеродинамічного профілю лопаті ротора, безрозмірна величина; C_q – коефіцієнт тиску на тильний бік лопаті при обертанні вертикально-осьового ротора, безрозмірна величина; C_{xT} – коефіцієнт сили лобового тиску на траверсу вертикально-осьового ротора, безрозмірна величина; D – діаметр

ротора, м; l – довжина лопаті, м; b – хорда лопаті, м; β – кут установки лопаті (кут між площиною обертання ротора та хордою лопаті), рад; α – кут атаки (кут між хордою лопаті і вектором набігаючого потоку), рад; S_λ – площа лопаті, м²; S_p – площа обмаху ротора, м²; n – кількість лопатей, безрозмірна величина; ω – кутова швидкість, рад/с; R_z – шорсткість поверхні лопаті, м; v_{nz} , v_{nv} – пускова швидкість відповідно горизонтально-осьового та вертикально-осьового ротора, м/с; I_p , I_z – момент інерції відносно осі обертання відповідно ротора вітрогенератора та електричного генератора, кг·м².

На основі аналізу розмірностей параметрів, які входять в рівняння (1)-(4), встановлено, що вони виражаються через розмірності початкових одиниць системи СІ: кілограм, метр, секунда, радіан. Позначимо їхні розмірності: маси $[M]$, довжини $[L]$, часу $[T]$, кута $[R]$.

Відповідно числу початкових основних одиниць система СІ в якості основних параметрів системи вибираємо такі параметри системи, розмірності яких є незалежними функціями параметрів початкових основних одиниць $[M]$, $[L]$, $[T]$, $[R]$ і обумовлюють можливість однозначного зворотного перетворення [5]. Тоді в якості основних для даної технічної системи ротора ВД ВЕУ вибираємо параметри: v – швидкість вітрового потоку, ρ – густина повітря, l – довжина лопаті, β – кут установки лопаті.

Як відомо [5], умовою незалежності розмірностей параметрів, які прийняті в якості основних одиниць, і умовою однозначного зворотнього перетворення є нерівність нулю визначника, складеного з показників степенів розмірностей початкових основних одиниць системи СІ, через які виражаються розмірності параметрів, які прийняті в якості основних. Складемо з показників степенів розмірностей початкових основних одиниць системи СІ, через які виражаються розмірності параметрів робочого процесу ВД визначник та знайдемо його значення:

$$\begin{aligned} [v] &= [M]^0 \cdot [L]^1 \cdot [T]^{-1} \cdot [R]^0; \\ [\rho] &= [M]^1 \cdot [L]^{-3} \cdot [T]^0 \cdot [R]^0; \\ [l] &= [M]^0 \cdot [L]^1 \cdot [T]^0 \cdot [R]^0; \\ [\beta] &= [M]^0 \cdot [L]^0 \cdot [T]^0 \cdot [R]^1; \end{aligned} \quad \Delta = \begin{vmatrix} 0 & 1 & -1 & 0 \\ 1 & -3 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} = -1 \neq 0.$$

Таким чином, вибрані в якості основних параметри робочого процесу ротора ВД ВЕУ: v , ρ , l , β , відповідають вимогам, які до них ставляться.

Розділивши почленно рівняння (1)-(4) на добуток вибраних в якості основних параметрів у невідомих степенях $v^{\delta_i} \cdot \rho^{\gamma_i} \cdot l^{\lambda_i} \cdot \beta^{\theta_i}$ одержимо рівняння, які виражають залежність потужності P_p та пускової швидкості v_n для горизонтально-осьового та вертикально-осьового ВД від параметрів вітру, типу і параметрів роторів ВЕУ в критеріальному виді.

Виходячи з умови, що одержані комплекси параметрів, які входять в одержані рівняння процесу в критеріальному виді, є безрозмірними величинами, визначені значення показників степенів розмірностей параметрів, які вибрані в якості основних (v , ρ , l , β), та одержані такі критерії подібності

$$\begin{aligned} \Pi_1 &= \frac{P_p}{v^3 \cdot \rho \cdot l^2}; \quad \Pi_2 = \frac{v}{v \cdot l}; \quad \Pi_3 = C_y; \quad \Pi_4 = C_x; \quad \Pi_5 = C_z; \quad \Pi_6 = \frac{D}{l}; \quad \Pi_7 = \frac{b}{l}; \quad \Pi_8 = \frac{\alpha}{\beta}; \quad \Pi_9 = \frac{S_\lambda}{l^2}; \\ \Pi_{10} &= \frac{S_p}{l^2}; \quad \Pi_{11} = n; \quad \Pi_{12} = \frac{\omega \cdot l}{v \cdot \beta}; \quad \Pi_{13} = \frac{R_z}{l}; \quad \Pi_{14} = C_q; \quad \Pi_{15} = C_{xT}; \quad \Pi_{16} = \frac{v_n}{v}; \quad \Pi_{17} = \frac{I_p}{\rho \cdot l^5}; \quad \Pi_{18} = \frac{I_z}{\rho \cdot l^5}. \end{aligned}$$

На основі аналізу одержаних критеріїв подібності встановлено:

1) всі критерії подібності відповідають вимогам, які до них ставляться – є безрозмірними комплексами параметрів, що характеризують робочий процес ВД;

2) критерій $\Pi_2 = \frac{v}{v \cdot l}$ є обернено пропорційною величиною критерія Рейнольдса $R_e = \frac{v \cdot l}{\nu}$, який є загальноприйнятим критерієм плавності обтікання тіл в аеродинаміці.

Виходячи з того, що критерії подібності (безрозмірні комплекси, які складені за певним правилом з параметрів технічної системи) повинні виконуватись на моделі та натурному зразку тех-

нічної системи та прийнявши позначення параметрів на моделі з індексом «м», а на натурному зразку з індексом «н» одержимо на основі критеріїв подібності формули, за яким можна визначити параметри натурального зразка ВД за значеннями параметрів його фізичної моделі і навпаки:

1) на основі критерія Π_1

$$\frac{P_{\rho n}}{v_n^3 \cdot \rho_n \cdot l_n^2} = \frac{P_{\rho m}}{v_m^3 \cdot \rho_m \cdot l_m^2}; \quad (5)$$

2) на основі критерія Π_2

$$\frac{v_n}{v_n \cdot l_n} = \frac{v_m}{v_m \cdot l_m}; \quad (6)$$

3) на основі критеріїв Π_3, Π_4, Π_5

$$C_{yn} = C_{ym}; \quad C_{xn} = C_{xm}; \quad C_{zn} = C_{zm}; \quad (7)$$

4) на основі критеріїв Π_6, Π_7

$$\frac{D_n}{l_n} = \frac{D_m}{l_m}; \quad \frac{b_n}{l_n} = \frac{b_m}{l_m}; \quad (8)$$

5) на основі критерія Π_8

$$\frac{\alpha_n}{\beta_n} = \frac{\alpha_m}{\beta_m}; \quad (9)$$

6) на основі критеріїв Π_9, Π_{10}

$$\frac{S_{\Delta n}}{l_n^2} = \frac{S_{\Delta m}}{l_m^2}; \quad \frac{S_{\rho n}}{l_n^2} = \frac{S_{\rho m}}{l_m^2}; \quad (10)$$

7) на основі критерія Π_{11}

$$n_n = n_m; \quad (11)$$

8) на основі критерія Π_{12}

$$\frac{\omega_n \cdot l_n}{v_n \cdot \alpha_n} = \frac{\omega_m \cdot l_m}{v_m \cdot \alpha_m}; \quad (12)$$

9) на основі критерія Π_{13}

$$\frac{R_{zn}}{l_n} = \frac{R_{zm}}{l_m}; \quad (13)$$

10) на основі критеріїв Π_{14}, Π_{15}

$$C_{qn} = C_{qm}; \quad C_{xTn} = C_{xTm}; \quad (14)$$

11) на основі критерія Π_{16}

$$\frac{v_{nn}}{v_n} = \frac{v_{nm}}{v_m}; \quad (15)$$

12) на основі критеріїв Π_{17}, Π_{18}

$$\frac{I_{\rho n}}{\rho_n \cdot l_n^5} = \frac{I_{\rho m}}{\rho_m \cdot l_m^5}; \quad \frac{I_{zn}}{\rho_n \cdot l_n^5} = \frac{I_{zm}}{\rho_m \cdot l_m^5}. \quad (16)$$

На основі аналізу формул для визначення параметрів, що характеризують натурні зразки ВД за значеннями параметрів їх фізичних моделей приходимо до висновків:

1) всі лінійні розміри натурального зразка ВД повинні відповідати лінійним розмірам його фізичної моделі, збільшеним відповідно прийнятому лінійному масштабу (див. формули (8), (13));

2) відношення площі лопатей ротора натурального зразка ВД до площі лопатей його фізичної моделі і відношення площі обмаху ротора натурального зразка до площі обмаху ротора його фізичної моделі повинні відповідати прийнятому лінійному масштабу в другому степені (див. формулу (10));

3) всі аеродинамічні коефіцієнти, які характеризують обтікання вітровим потоком лопатей ротора натурального зразка ВД повинні відповідати аеродинамічним коефіцієнтам, які характеризують обтікання вітровим потоком лопатей його фізичної моделі (див. формули (7), (14));

4) при прийнятому куті установки лопатей, який повинен бути однаковим на моделі та натурному зразку, кут атаки вітрового потоку повинен бути також однаковим (див. формулу (9));

5) кількість лопатей ротора натурального зразка ВД повинна відповідати кількості лопатей ротора його фізичної моделі (див. формулу (11));

6) при однаковій швидкості вітрового потоку, що обтікає лопаті натурального зразка ВД і лопаті його фізичної моделі і однаковому куті атаки лопатей відношення кутової швидкості обертання ротора натурального зразка ВД до кутової швидкості обертання ротора його фізичної моделі обернено пропорційне прийнятому лінійному масштабу (див. формулу (12));

7) при однаковій густині повітря, що обтікає лопаті ротора натурального зразка ВД і лопаті його фізичної моделі відношення величини моменту інерції ротора натурального зразка ВД до величини моменту інерції ротора його фізичної моделі та відношення величини моменту інерції ротора натурального зразка генератора ВЕУ до величини моменту інерції його фізичної моделі повинно дорівнювати прийнятому лінійному масштабу в п'ятому степені (див. формулу (16));

8) при однаковій швидкості вітрового потоку, який обтікає лопаті ротора натурального зразка ВД і лопаті його фізичної моделі, пускова швидкість натурального зразка ВД повинна відповідати пусковій швидкості його фізичної моделі (див. формулу (15));

9) при однаковій густині повітря і швидкості вітрового потоку, що обтікає лопаті натурального зразка ротора ВД і лопаті його фізичної моделі, відношення потужності на валу ротора натурального зразка до потужності на валу його фізичної моделі дорівнює прийнятому лінійному масштабу в другому степені (див. формулу (16));

10) критерій P_2 , який характеризує плавність обтікання вітровим потоком лопатей ВД, повинен бути однаковим для моделі і для натурального зразка.

Висновки. Виконаними дослідженнями встановлено:

для вибору раціональних значень параметрів роторів вітрогенераторів ВЕУ малої потужності крім математичного необхідно виконати експериментальні дослідження на їх фізичних моделях;

на основі аналізу процесів обтікання вітровим потоком лопатей роторів горизонтально-осьового та вертикально-осьового ВД згідно з методом нульових розмірностей встановлені критерії подібності процесу обтікання, які повинні виконуватись на натурному зразку ВД та його моделі;

параметри натурних зразків роторів вітрогенераторів повинні визначатись згідно з залежностями, одержаними на основі критеріїв подібності процесу обтікання вітровим потоком лопатей ВД натурального зразка та його фізичної моделі.

Список літератури

1. Шефтер Я.И. Ветроэнергетические агрегаты. – М.: Машиностроение, 1972. – 285 с.
2. Фатеев Е.М. Ветрогенераторы и ветроустановки / Е.М. Фатеев – М.: ОГИЗ – Сельхозгиз, 1948. – 544 с.
3. Абрамовский Е.Р. Аэродинамика ветродвигателей / Е.Р. Абрамовский, С.В. Горюшко, Н.В. Свиридов. – Днепропетровск: ДГУ, 1987. – с. 165-169.
4. Подобие аэродинамических процессов. Интернет-ресурс msd.com.ua/otoplenie-i-...
5. Аэродинамическое подобие. Параметры подобия. Интернет-ресурс [studopedia.su/...](http://studopedia.su/)
6. Аэродинамическое подобие и его составляющие. Интернет-ресурс akpla.ucoz/GGD/zanjatie...7.1.pdf.
7. Алабужев П.М., Геронимус В.Б., Минкевич Л.М., Шаховцев Б.А. Теория подобия и размерностей. Моделирование. Учебное пособие для вузов. М.: Высшая школа, 1968. – 205 с.
8. Гулівець О.А., Олійник С.Ю., Ільченко Р.А. Вплив характеристик вітрового потоку і параметрів ротора вітрогенераторів на його енергетичні параметри. Вісник Криворізького національного університету: Вісник наукових праць. Випуск 45. – Кривий Ріг: ДВНЗ «КНУ», 2017. – с. 51-55.
9. Расчет лопастей для ветряков – Малая энергетика. Интернет-ресурс rosinmn.ru>VETRO_blade Design/
10. Философия конструирования ветродвигателя. Малая энергетика. Интернет-ресурс rosinmn.ru>VETRO_icht_s...

Рукопис подано до редакції 14.11.2017