

*На основі диференціальних рівнянь, що представляють газоповітряний тракт виробничого обладнання і характеризують його процеси, з використанням закону збереження маси і балансу тисків, розроблена методика для визначення розподілу газоповітряних потоків на виході технологічного тракту. Розроблена математична модель для встановлення механізму впливу на швидкість газоповітряного потоку і визначення місця розташування гвинта генератора у газоповітряному потоку для вироблення газоповітряною енергетичною установкою максимальної електроенергії*

*Ключові слова: газоповітряна енергетична установка, газоповітряні потоки, технологічний тракт, електроенергія, лабораторний стенд*

*На основе дифференциальных уравнений, представляющих газоздушный тракт производственного оборудования и характеризующих его процессы, с использованием закона сохранения массы и баланса давлений, разработана методика для определения распределения газоздушных потоков на выходе технологического тракта. Разработана математическая модель для установления механизма влияния на скорость газоздушного потока и определения местоположения винта генератора в газоздушном потоке для выработки газоздушной энергетической установкой максимальной электроэнергии*

*Ключевые слова: газоздушная энергетическая установка, газоздушные потоки, технологический тракт, электроэнергия, лабораторный стенд*

УДК 621.548

DOI: 10.15587/1729-4061.2018.126903

## МОДЕЛЮВАННЯ ВІДПРАЦЬОВАНОВОГО ВИРОБНИЧИМ ОБЛАДНАННЯМ ГАЗОПОВІТРЯНОГО ПОТОКУ

**В. Й. Лобов**

Кандидат технічних наук, доцент\*

E-mail: lobovvjcheslav@gmail.com

**К. В. Лобова\***

E-mail: karinalobova409gmail.com

**О. В. Митрофанов**

Аспірант\*

E-mail: mitrofanov.322@gmail.com

**В. М. Митрофанов**

Інженер-механік

ГОК УКРМЕХАНОБР

вул. Демиденко, 2,

м. Кривий Ріг, Україна, 50027

E-mail: vycheslavnikolaevich@gmail.com

\*Кафедра автоматизації,

комп'ютерних наук і технологій

Криворізький національний університет

вул. Віталія Матусевича, 11,

м. Кривий Ріг, Україна, 50027

### 1. Вступ

Ринкова економіка вимагає підвищення ефективності електроспоживання виробничими установками підприємства, так як це відповідає економічним інтересам постачальника і споживача електроенергії. Пошук на підприємстві альтернативних джерел енергії є основним завданням сучасного виробництва. В якості джерела енергії можуть бути використані відпрацьовані в технологічному процесі газоповітряні потоки. Одним з напрямків вирішення цього завдання є отримання у споживача електроенергії за допомогою відбирання кінетичної енергії відпрацьованих газоповітряних потоків на виході виробничого обладнання. Для цього впроваджують газоповітряні енергетичні установки (ГПЕУ). Електроенергія в ГПЕУ отримується шляхом перетворення механічної енергії обертання гвинта генератора у електричну енергію. Доцільність розробки нових ГПЕУ з сучасними системами управління відповідає енергетичній стратегії України на період до 2030 року [1]. Тому саме цей напрямок має забезпечити частину загального енергозбереження у споживача. ГПЕУ потребує підвищен-

ня ефективності роботи для отримання максимальної електричної енергії. Це досягається при достатній потужності та кінетичній енергії газоповітряного потоку. Одночасно потужність газоповітряного потоку є пропорційною площі перетину потоку, щільності та швидкості в третій ступені.

У цьому напрямку в усьому світі проводиться велика наукова робота, у результаті якої з'являються нові розробки, підтвердженням цьому можуть працю, присвячені дослідженням, які суттєво впливають на ефективність роботи енергетичних установок [2, 3].

Відповідно до теорії ідеального гвинта, що приводиться в дію газоповітряним потоком, його корисна робота перетворюється в частину кінетичної енергії. Тому необхідно провести додаткові дослідження впливу газоповітряних потоків для визначення умов забезпечення максимальної ефективності роботи ГПЕУ. Це свідчить про те, що тематика досліджень, присвячених процесу розподілу відпрацьованих газоповітряних потоків на виході технологічного тракту виробничого обладнання для отримання ефективної роботи ГПЕУ, є актуальною науковою та практичною задачею.

## 2. Аналіз літературних даних і постановка проблеми

У дослідженні [4] показано, що автономна вітроенергетична установка використовує шахтні повітряні потоки. При цьому ефективність роботи цієї установки є малою, так як повітряні потоки у підземних гірничих виробках залізрудних шахт є не значними.

Використання енергії вітру при роботі вітроенергетичних установок залежить від швидкості вітрового потоку. Проте вітровий потік змінюється протягом доби, впродовж місяця і сезону року [5]. Тому кінетична енергія вітру має низьку ефективність. Для усунення цього недоліку автори пропонують комплексно використовувати вітроенергетичні установки і установки, що працюють на сонячній енергії [6, 7], або низько потенційні повітряні, теплові та гідравлічні потоки [8, 9]. У науковій роботі [10] дослідження направлені на розробку математичних моделей для визначення впливу турбулентного повітряного потоку на роботу вітроустановки. Для цього пропонують виконувати комп'ютерне і фізичне моделювання. В інших статтях автори використовують генетичні алгоритми [11]. У той же час, Європейська академія вітроенергетики вирішує проблеми енергії вітру в довгостроковій дослідницькій програмі досліджень [12]. Проте, вивчаючи питання побудови сучасних автоматизованих систем управління вітроенергетичних установок, дослідники недостатню увагу приділяють дослідженню впливу газоповітряних потоків на роботу ГПЕУ для отримання максимальної кількості електроенергії. Незважаючи на очевидне, отримання у споживача додаткової електроенергії за допомогою відбирання кінетичної енергії відпрацьованих газоповітряних потоків від виробничого обладнання взагалі дослідниками не розглядається. Це накладає певні обмеження на використання ГПЕУ. Одночасно відмічається розвиток вітроенергетичних установок малої та надмалої потужності [13–15]. Але для таких установок у достатній мірі не проводяться дослідження для умов забезпечення максимальної ефективності їх роботи. У праці [16] показані шляхи підвищення ефективності роботи повітряних енергетичних установок, але не для ГПЕУ, які працюють від відпрацьованих газоповітряних потоків виробничого обладнання. До відомих способів вироблення альтернативної електроенергії можна віднести спосіб, котрий включає перетворення теплової енергії у механічну роботу в газотурбінній установці [17]. Проте, при такому способі вироблення електроенергії необхідні додаткові затрати на стиснення повітря і спалювання вуглеводневого палива. Одночасно потрібне змішання продуктів згоряння із водяною парою та охолодження газопарової суміші. Це значно зменшує коефіцієнт корисної дії та потребує додаткове обладнання, яке дорого коштує. Іншим відомим є спосіб отримання електроенергії у метрополітені [18], який включає операції по створенню і використанню повітряних потоків. Перетворення механічної енергії в електричну здійснюється шляхом штучного створення повітряних потоків від переміщення електропоїзда. Обертний момент повітряного гвинта одночасно приводить у дію вал генератора, що виробляє електроенергію. Недоліком даного способу є те, що не повністю використовується потік повітряних мас, котрі виникають у наслідок руху електропоїзда, що знижує ефективність отримання електроенергії. Реалізація цього способу потребує додатково формувати потік повітряних мас на лопаті гвинта генератора. Це суттєво знижує

коефіцієнт корисної дії перетворення повітряних мас у механічну енергію. Реалізація цього способу додатково потребує матеріальних і фінансових витрат.

Сучасні дослідження направлені на удосконалення конструкцій та систем управління вітрових енергетичних установок [19–21]. Вітроенергетичні установки становлять дуже складну електромеханічну систему, та системи керування ними потребують удосконалення. Поставлену задачу удосконалюють пристрої [22, 23], які використовують потік маси газів/повітря, відпрацьованих, вивільнених або видуваємих технологічним обладнанням. Пристрої мають керовану систему управління. Вона живиться від електричної мережі та електричної енергії, отриманої від перетворення кінетичної енергії потоку маси газів/повітря. Пристрої працюють від технологічного обладнання, що складається із каналу технологічного тракту для відводу газового/повітряного потоку. Всередині каналу встановлений повітряний гвинт вентилятора. ГПЕУ складається з: гвинта генератора, генератора, мікроконтролера, комутаторів, датчиків тиску газового/повітряного потоку, перетворювача частоти і блоку управління. Це дозволяє зменшити кількість використаної електроенергії виробничим обладнанням. Проте, робота ГПЕУ залежить від наявності потрібного стабільного потоку в технологічному тракту. Це не дає змоги ГПЕУ використовувати енергію потоку в повному обсязі. Окрім того, при такому управлінні потрібно вибрати оптимальний кут атаки лопатів гвинта генератора, що суттєво ускладнює конструкцію ГПЕУ. Невирішена також досліджувана проблема по розподілу відпрацьованих газоповітряних потоків на виході технологічного тракту виробничого обладнання. Не розглядалося питання визначення місця найбільшої інтенсивності газоповітряних потоків при виході з технологічного тракту. Визначення цих умов необхідно для вироблення ГПЕУ максимальної електричної енергії.

## 3. Ціль та задачі дослідження

Метою даної роботи є моделювання відпрацьованого виробничим обладнанням газоповітряного потоку з отриманням газоповітряною енергетичною установкою максимальної виробленої електричної енергії.

Для досягнення поставленої мети вирішувалися наступні задачі:

- розробити методику для розрахунків швидкості газоповітряного потоку при виході з технологічного тракту;
- розробити математичну модель для визначення розподілу газоповітряних потоків на виході з технологічного тракту;
- перевірити на адекватність результати, що отримані на математичній моделі, використовуючи лабораторний стенд.

## 4. Дослідження розподілу газоповітряних потоків

### 4.1. Методика розрахунку швидкості газоповітряного потоку при роботі вентилятора на технологічний тракт

Для відповіді на питання про розрахунок швидкості газоповітряного потоку при нагнітанні вентилятором і виході з технологічного тракту виробничого обладнання доцільно використати шахтні вентилятори місцевого провітрювання типів ВМЭВО. Ці вентилятори призначені

для провітрювання тушкових гірничих виробок у вугільних і рудних шахтах, включаючи небезпечні по газу і пилу. Подають газ/повітря по гнучкому або жорсткому технологічному тракту діаметром від 0,6 до 1,2 метрів і довжиною більше 25 метрів. Для розрахунків підібрані п'ять моделей шахтних вентиляторів. Технічні характеристики зазначені в табл. 1.

Для розрахунків швидкості газоповітряного потоку в технологічному тракту, вихідної його потужності, впливу параметрів технологічного тракту та інших його показників, необхідно отримати відповідні математичні вирази. Важливим кроком при цьому є визначення потужності повітряного потоку на виході технологічному тракту, тобто яку кількість електроенергії ми зможемо отримати, наприклад, використовуючи вентилятори типів ВМЭВО. Так, потужність на виході технологічному тракту визначаємо за формулою [24]:

$$P_{\text{вих}} = C_p \frac{\rho \cdot V^3}{2} \cdot D \cdot H \cdot \eta_{\text{зар}}, \tag{1}$$

де  $C_p$  – коефіцієнт потужності, рівний відношенню потужності набігаючого потоку газ/повітря до потужності на валу ротора;  $V$  – швидкість газоповітряного потоку, м/с;  $\rho$  – густина газ/повітря, кг/м<sup>3</sup>;  $\eta_{\text{зар}}$  – попередньо заданий ККД;  $H$  – висота лопаті;  $D$  – діаметр.

Перш ніж визначати вихідну потужність, необхідно розрахувати швидкість газоповітряного потоку для кожної моделі вентилятора. Швидкість газоповітряного потоку, що створюється вентилятором, знайдемо за відомою формулою:

$$V = \frac{Q}{S}, \tag{2}$$

де  $Q$  – об'ємна витрата газ/повітря вентилятора;  $S$  – площа технологічному тракту.

Площу технологічному тракту обчислимо за формулою [25]:

$$S = 2\pi r l + 2\pi r^2 = 2\pi r(l + r), \tag{3}$$

де  $r$  – радіус;  $l$  – довжина технологічному тракту.

Для розрахунків взяті наступні розміри технологічному тракту:  $r = 50 \text{ мм} = 0,05 \text{ м}$  – радіус;  $l$  дорівнює одному метру довжини технологічному тракту.

Максимум корисної енергії отримується за допомогою гвинта генератора. Він кінематично пов'язаний з ротором генератора. Величина енергії оцінюється коефіцієнтом використання енергії газоповітряного потоку, максимальне значення якого може дорівнювати 0,593. Крім того, як показує практика, існуючими конструкціями ГЕПУ повністю використовується не весь діапазон швидкості газоповітряного потоку. При швидкості повітряного потоку нижче мінімальної, робочої потужності гвинта не вистачає навіть на перемотування сил тертя у його вузлах. За формулою (2) розраховані швидкості величини газоповітряних потоків для кожного типу вентилятора.

#### 4. 2. Розробка математичної моделі розподілу газоповітряних потоків на виході з технологічного тракту

Для визначення розподілу газоповітряного потоку в технологічному тракту при нагнітанні його вентилятором і ефективного використання кінетичної енергії відпрацьованих виробничим обладнанням газоповітряного потоку для виробленні електричної енергії розробимо математичну модель. Для цього введемо диференціальні рівняння для опису технологічного тракту і елементів ГПЕУ, що представлена на рис. 1.

Позначимо змінні (керуючі величини): швидкість обертання дугтьового вентилятора через  $\omega_{\text{дв}}$ , а швидкість обертання гвинта генератора –  $\omega_{\text{г}}$ , і вихідні змінні (регульовані величини): витрати газоповітряного потоку відповідно до –  $Q_{\text{вх}}$  і після  $Q_{\text{вих}}$  гвинта генератора.

Таблица 1

Технічні характеристики вентиляторів

Параметри	Назва	ВМЭВО-5-15	ВМЭВО-6-25	ВМЭВО-8-45	ВМЭВО-10-110	ВМЭВО-12-110
Номинальний діаметр, мм		500	600	800	1000	1200
Номинальна подача, м <sup>3</sup> /с		3,6	7	9	14	23
Номинальний повний тиск, Па		2300	2500	3500	5200	3300
Максимальний ККД		0,66	0,7	0,7	0,67	0,7
Потужність електроприводу, кВт, не більше		15	25	45	110	110
Частота обертання, хв. <sup>-1</sup>		3000	3000	3000	3000	1500
Висота, мм, не більше		770	895	1105	1160	1385
Ширина, мм, не більше		600	775	1000	1100	1200
Довжина, мм, не більше		950	1035	1190	1530	1961

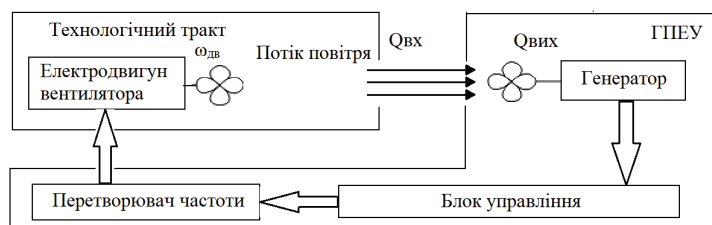


Рис. 1. Технологічний тракт і елементи ГПЕУ

Запишемо фізичні рівняння, що характеризують процеси газоповітряного тракту через закон збереження маси:

$$\frac{dm}{dt} = Q_{\text{вх}} - Q_{\text{вих}}. \quad (4)$$

Різниця між повітряними потоками на вході та виході акумулюється в робочому полі розташування гвинта генератора. Рівняння стану, як відомо з курсів термодинаміки, має вигляд:

$$PV = \frac{m}{\mu} RT, \quad (5)$$

де  $V = V_T$ , а  $m = V_T = V_p$ .

Із рівняння (4) отримуємо співвідношення, що зв'язує масу і тиск у даному випадку:  $m = k_{\text{сн}} P$ . Підставивши співвідношення в закон збереження маси (4), отримуємо формулу вимірювання тиску:

$$k_{\text{сн}} \frac{dp}{dt} = Q_{\text{вх}} - Q_{\text{вих}}. \quad (6)$$

Мінливе розрідження у робочому полі до і після гвинта генератора враховується в системі рівнянь за допомогою балансу тисків. Запишемо баланс тисків [26] у вигляді системи диференціальних рівнянь для ділянки до і після гвинта генератора:

$$\begin{cases} \frac{l_T}{S_T} \frac{dQ_{\text{вх}}}{dt} = P_{\text{дв}} - P_T - P_{\text{от}}; \\ \frac{l}{S} \frac{dQ}{dt} = P_{\text{гт}} - P_T - P_{\text{отт}}. \end{cases} \quad (7)$$

Ввівши допущення, що потоки повітря і газу ламінарні, запишемо рівняння гідродинаміки, що встановлюють співвідношення між витратою і втратами тиску на опір:

$$\begin{cases} P_{\text{от}} = \xi_{\text{от}} Q_{\text{вх}}; \\ P_{\text{отт}} = \xi_{\text{отт}} Q_{\text{вих}}. \end{cases} \quad (8)$$

Перепишемо диференціальні рівняння (7) з урахуванням (8) у вигляді:

$$\begin{cases} \frac{l_T}{S_T} \frac{dQ_{\text{вх}}}{dt} = P_{\text{дв}} - P_T - \xi_{\text{от}} Q_{\text{вх}}; \\ \frac{l}{S} \frac{dQ}{dt} = P_{\text{гт}} - P_T - \xi_{\text{отт}} Q_{\text{вих}}. \end{cases} \quad (9)$$

Рівняння дугтьового вентилятора і роботи гвинта генератора в припущенні записуються так, що тиск у них залежить лінійно від швидкості обертання двигуна:

$$\begin{cases} P_{\text{дв}} = k_{\text{дв}} \omega_{\text{дв}}; \\ P_{\text{гт}} = k_{\text{гт}} \omega_{\text{гт}}. \end{cases} \quad (10)$$

Після перетворень отримані диференціальні рівняння об'єднаємо в систему, що характеризує газоповітряний тракт, як об'єкт регулювання [27]:

$$\begin{cases} Q'_{\text{вх}} = -\xi_{\text{от}} \frac{S_{\text{от}}}{l_{\text{от}}} Q_{\text{от}} + k_{\text{от}} \frac{S_{\text{от}}}{l_{\text{от}}} \omega_{\text{от}} + \frac{S_{\text{от}}}{l_{\text{от}}} P_m; \\ Q'_{\text{вих}} = -\xi_{\text{отт}} \frac{S_{\text{тт}}}{l_{\text{тт}}} Q_{\text{вих}} + k_{\text{тт}} \frac{S_{\text{тт}}}{l_{\text{тт}}} \omega_{\text{тт}} + \frac{S_{\text{тт}}}{l_{\text{тт}}} P_m; \\ P'_m = \frac{1}{k_{\text{сн}}} Q_{\text{вх}} - \frac{1}{k_{\text{сн}}} Q_{\text{вих}}. \end{cases} \quad (11)$$

Для моделювання в програмному середовищі Solid-Works Flow Simulation [28] отримуємо необхідну систему рівнянь. Система рівнянь враховує: збереження маси, імпульсу і енергії нестационарної просторової течії у декартовій системі координат  $(x_i, i = 1, 2, 3)$ . Система координат обертається з кутовою швидкістю  $\Omega$  навколо осі, що проходить через її початок [29]:

$$\begin{cases} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_k} (\rho u_k) = 0; \\ \frac{\partial (\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_k} (\rho u_i u_k - \tau_{ik}) + \frac{\partial}{\partial x_i} S_i; \\ \frac{\partial (pE)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_k} ((pE - P)u_k + q_k) - \tau_{ik} u_i = S_k u_k + Q_H, \end{cases} \quad (12)$$

де  $t$  – час,  $u$  – швидкість газоповітряного потоку;  $\rho$  – щільність газоповітряного потоку;  $P$  – тиск газоповітряного потоку;  $S_i$  – зовнішні масові сили, що діють на одиничну масу газоповітряного потоку;  $S_{\text{оп}}$  – дія опору пористого тіла;  $S_{\text{гт}}$  – дія гравітації;  $S_{\text{оск}}$  – дія обертання системи координат.  $S_i = S_{\text{оп}} + S_{\text{гт}} + S_{\text{оск}}$ ;  $E$  – повна енергія одиничної маси газоповітряного потоку;  $Q_H$  – тепло, що виділяється тепловим джерелом в одиничному обсязі газоповітряного потоку;  $\tau_{ik}$  – тензор в'язких зсувних напружень;  $q_i$  – дифузний тепловий потік, нижні індекси означають підсумовування за трьома координатними напрямками.

Для ньютонівських текучих середовищ тензор в'язких зсувних напружень визначається наступним чином:

$$\tau_{ij} = \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2\partial u_i}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij}, \quad (13)$$

де  $\mu = \mu_l + \mu_t$ ,  $\mu_l$  – коефіцієнт динамічної в'язкості;  $\mu_t$  – коефіцієнт турбулентної в'язкості;  $\delta_{ij}$  – дельта-функція Кронекера ( $\delta_{ij} = 1$  при  $i = j$ ,  $\delta_{ij} = 0$  при  $i \neq j$ );  $k$  – кінетична енергія турбулентності. Відповідно  $k - \epsilon$  є моделлю турбулентності,  $\mu_t$  визначається через величини кінетичної енергії турбулентності  $k$  і дисипації цієї енергії  $\epsilon$ :

$$\mu_t = f_\mu \frac{C_\mu \rho k^2}{\epsilon};$$

$$f_\mu = \left( 1 - \exp(-0,025 R_y) \right)^2 \cdot \left( 1 + \frac{20,5}{R_t} \right);$$

$$R_y = \frac{\rho \sqrt{ky}}{u_i}; \quad R_t = \frac{\rho k^2}{u_i \epsilon};$$

$$\text{де } f_\mu = \left( 1 - \exp(-0,025 R_y) \right)^2 \cdot \left( 1 + \frac{20,5}{R_t} \right);$$

$$R_y = \frac{\rho \sqrt{ky}}{u_i}; \quad R_t = \frac{\rho k^2}{u_i \epsilon};$$

$y$  – відстань від поверхні стінки;  $C_\mu = 0,09$ .

Кінетична енергія турбулентності  $k$  і дисипація цієї енергії  $\epsilon$  визначаються в результаті рішення наступних двох рівнянн [30]:

$$\frac{\partial \rho k}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_k} (\rho u_k k) + \frac{\partial}{\partial x_k} \left[ \left( \mu_l + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_k} \right] + S_k, \quad (14)$$

$$\frac{\partial \rho \epsilon}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial X_k} (\rho u_k \epsilon) + \frac{\partial}{\partial X_k} \left[ \left( \mu_i + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial X_k} \right] + S_\epsilon, \quad (15)$$

де

$$S_k = \tau_{ij}^R \frac{du_i}{dx_j} - \rho \epsilon + \mu_t P_B; \quad (16)$$

$$S_\epsilon = C_{\epsilon 1} \frac{\epsilon}{k} \left( f_1 \tau_{ij}^R \frac{du_i}{dx_j} + \mu_t C_B P_B \right) - C_{\epsilon 2} f_2 \frac{\rho \epsilon^2}{k},$$

$$\tau_{ij}^R = \mu_t \left( \frac{du_i}{dx_j} + \frac{du_j}{dx_i} - \frac{2}{3} \frac{du_l}{dx_l} \delta_{ij} \right) - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij};$$

$$P_B = - \frac{g_i}{\sigma_B} \frac{1}{p} \frac{dp}{dx_i}, \quad (17)$$

де  $g_i$  – складова гравітаційного прискорення в координатному напрямку.  $x_i$ ,  $\sigma_B = 0,9$ ;  $C_B = 1$  при  $P_B > 0$  і  $C_B = 0$  при  $P_B \leq 0$ ,  $f_1 = 1 + (0,05/f_\mu)^3$ ,  $f_2 = 1 - \exp(-R_T^2)$ ;  $C_{\epsilon 1} = 1,44$ ;  $C_{\epsilon 2} = 1,92$ ;  $\sigma_\epsilon = 1,3$ ;  $\sigma_k = 1$ .

Дифузійний тепловий потік моделюється за допомогою рівняння:

$$q_k = \left( \frac{\mu_l}{p_r} - \frac{\mu_t}{\sigma_c} \right) c_p \frac{dT}{dx_k}, \quad k = 1, 2, 3, \quad (18)$$

де  $\sigma_c = 0,9 Pr$  – число Прандтля;  $c_p$  – питома теплоємність при постійному тиску;  $T$  – температура газоповітряного потоку.

### 4. 3. Лабораторний стенд для дослідження розподілу газоповітряних потоків на виході технологічного тракту

Для перевірки на адекватність результатів, що отримані на математичній моделі, розроблено інформаційне та програмне забезпечення, схема автоматизації та виготовлений лабораторний стенд, який через інтерфейс USB-2 з'єднаний з ЕОМ. Стенд складається з технологічного тракту. На вхіді технологічному тракту встановлений гвинт вентилятора. ГПЕУ керує роботою вентилятора. На виході технологічного тракту встановлено гвинт, який кінематично пов'язаний з генератором. Вихідна напруга генератора накопичується у ГПЕУ. Технічні характеристики вентилятора, технологічного тракту і гвинта генератора надані у табл. 2.

Таблиця 2

Технічні характеристики вентилятора, технологічному тракту і гвинта для генератора

Вентилятор DeerCool GS120	Технологічний тракт	Гвинт для генератора
Діаметр вентилятора: 110 мм	Довжина: 500 мм	Діаметр вентилятора: 110 мм
Кількість лопатей: 11	Діаметр: 110 мм	Кількість лопатей: 3; кут нахилу лопатей 32,73°
Діаметр: 38,5 мм	Товщина стінок 4 мм	Діаметр 38,5 мм
Матеріал: поліпропілен	Матеріал: оліпропілен	Матеріал: поліпропілен
Повітряний потік: 61,93 cfm (1,754 м³/хв)	–	–

Для виявлення закономірностей електроспоживання, підтвердження технічних показників та ефективності запропонованого способу отримання електроенергії за допо-

могою ГПЕУ на ЕОМ встановлена віртуальна модель. Ця модель розроблена у програмному середовищі LabVIEW. Експериментальним способом зняті енергетичні характеристики роботи ГПЕУ при зміні швидкості обертання лопотів вентилятора. Отримані дані зведені у табл. 3.

Таблиця 3

Характеристики роботи ГПЕУ при зміні швидкості обертання лопотів вентилятора

$U_B$ , В	$\omega$ , об/хв	$U_T$ , В	$I$ , А	$P$ , Вт	$Q_{вх}$ , м³/с	$Q_{вих}$ , м³/с
23,45	4300	4,55	0,406	9,5	5,4	4,5
22,08	3507	4,41	0,39	8,6	4,6	3,7
21,22	3280	3,8	0,37	7,85	4,0	3,1
20,46	3001	2,12	0,36	7,36	3,6	2,7
18,6	2512	0	0,35	6,51	3	2,1

З табл. 2 видно, що при збільшенні напруги живлення  $U_B$  двигуна збільшується швидкість обертання лопотів вентилятора. Одночасно збільшується напруга  $U_T$  та струм  $I$ , на виході генератора. Витрати газоповітряного потоку до гвинта генератора  $Q_{вх}$  зменшується після нього  $Q_{вих}$  до 30 % при зменшенні швидкості обертання лопотів вентилятора. Експеримент і модель розрахунку підтвердили основні характеристики роботи ГПЕУ.

### 5. Результати дослідження розподілу газоповітряного потоку на виході технологічного тракту

Використовуючи математичні вирази (1)–(3), побудовано залежності вихідної потужності від швидкості повітряного потоку для різних типів шахтних вентиляторів. Характеристики представлені на рис. 2, а. Як показує аналіз цих характеристик, для збільшення швидкості повітряного потоку на виході технологічному тракту потрібно збільшити вихідну потужність вентилятора. Маємо практично лінійні залежності, за виключенням однієї моделі вентилятора типу ВМЭВО-12-110 (рис. 2, а). Розміри лопаті гвинта підвищують потужність повітряного потоку на виході технологічному тракту (рис. 2, б). Збільшення швидкості потоку повітря від площі (рис. 2, в) і від довжини (рис. 2, з) технологічного тракту приводять до зменшення швидкості повітряного потоку на виході технологічному тракту.

Використовуючи математичні вирази (4)–(18), виконано моделювання процесу розподілу повітряних потоків у програмному середовищі SolidWorks Flow Simulation. Моделювання виконано при нагнітанні повітря вентилятором на вихід технологічному тракту.

На рис. 3 наведений результат моделювання процесу розподілу повітряних потоків за межами технологічному тракту технологічного тракту. Гвинт генератора розташований на відстанях 400 мм (рис. 3, а) і 1000 мм (рис. 3, б) від виходу технологічному тракту. При цьому швидкість обертання лопотів вентилятора становила 4300 об/хв.

Зміна швидкості повітряного потоку на краю і середині діаметру на виході технологічного тракту відповідно представлені на рис. 4, а, б. При цьому швидкість обертання лопотів вентилятора складала 4300 об/хв. Зменшення швидкості обертання лопотів вентилятора до 2500 об/хв при різній відстані гвинта генератора на середині діаметру технологічному тракту характер залежності залишається незмінним (рис. 5).

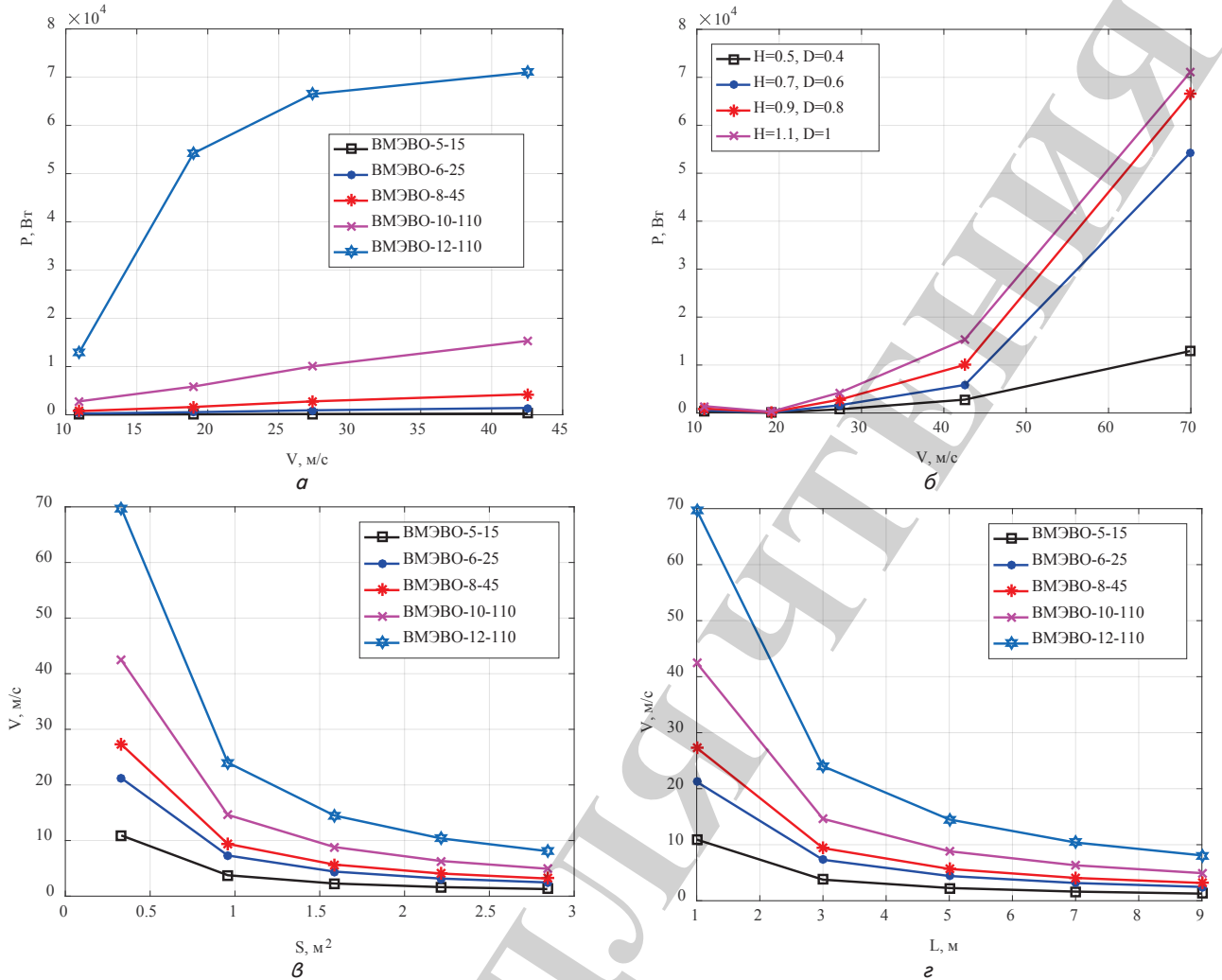


Рис. 2. Залежності вихідної потужності вентиляторів: а – від швидкості газоповітряного потоку; б – при різних розмірах лопаті гвинта; в – швидкості потоку від площі; г – від довжини технологічному тракту

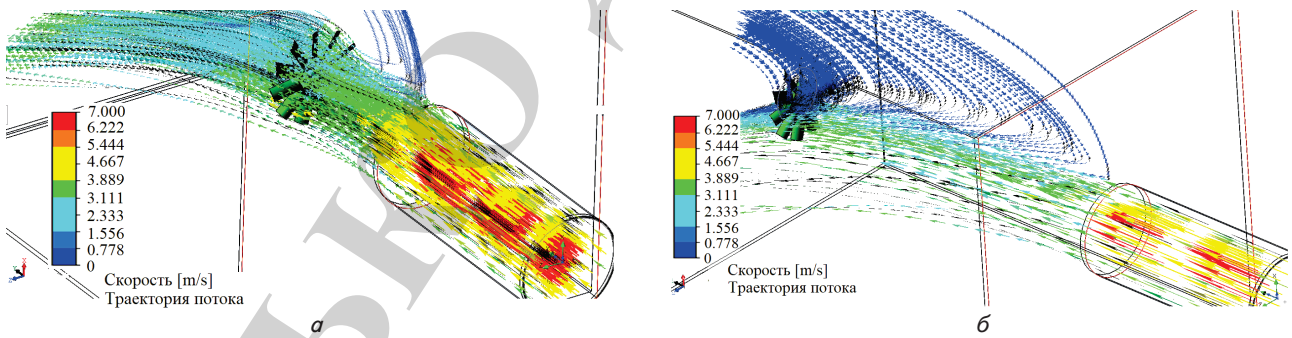


Рис. 3. Моделювання процесу розподілу повітряного потоку на відстанях від виходу технологічному тракту до і після гвинта генератора: а – 400 мм ; б – 1000 мм

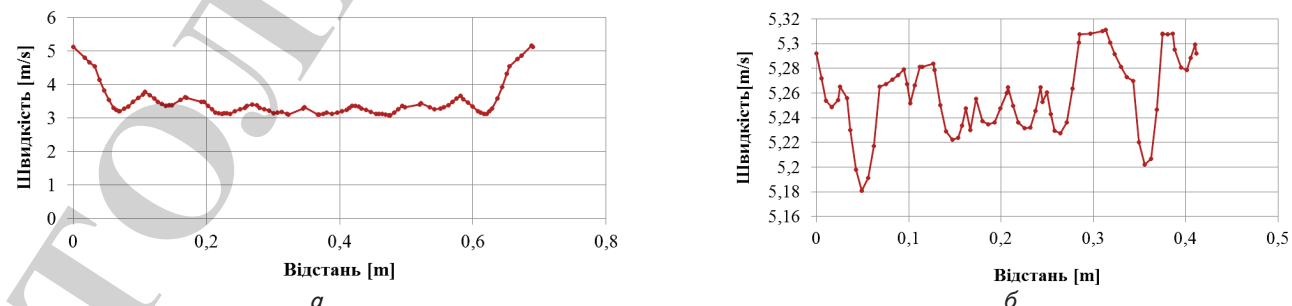


Рис. 4. Зміна швидкості повітряного потоку: при швидкості обертання лопотів вентилятора 4300 об/хв: а – на краю і б – середині діаметру технологічному тракту

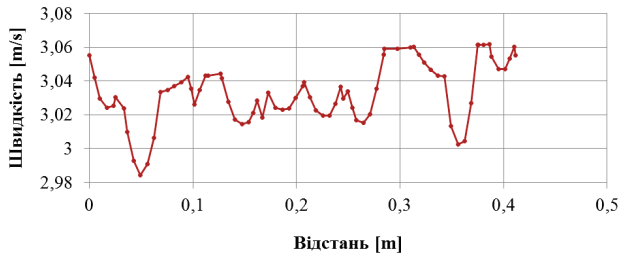


Рис. 5. Зміна швидкості повітряного потоку: при швидкості обертання лопотів вентилятора 2500 об/хв на середині діаметру технологічному тракту

Тиск повітря на виході технологічному тракту на краю діаметру і середині технологічному тракту відповідно представлені на рис. 6, а, б.

Зміна температури повітря і числа махів лопотів генератора на виході технологічному тракту надані відповідно на рис. 7, 8.

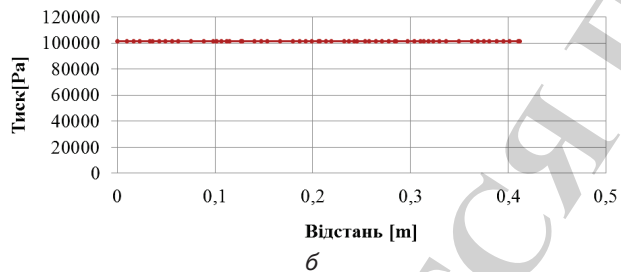
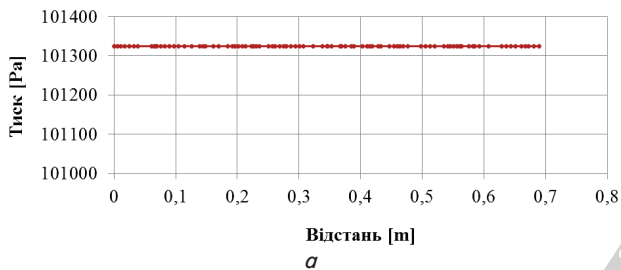


Рис. 6. Зміна тиску повітря на виході технологічному тракту: а – край діаметру технологічному тракту; б – середина діаметру технологічному тракту

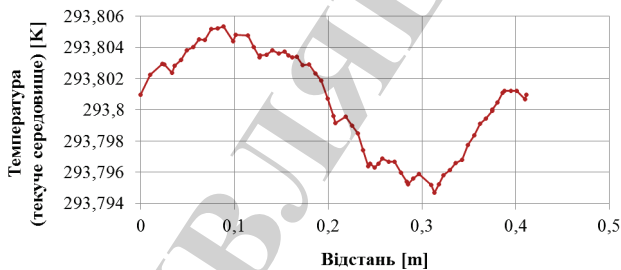


Рис. 7. Зміна температури повітря на виході технологічному тракту

Для перевірки на адекватність результатів, що отримані за допомогою математичної моделі, виконано зняття характеристик ППЕУ на лабораторному стенді. Для цього використаний програмний додаток LabView та анемометр, пристрій для вимірювання швидкості повітряного потоку. Порівнянні характеристики надані на рис. 9.

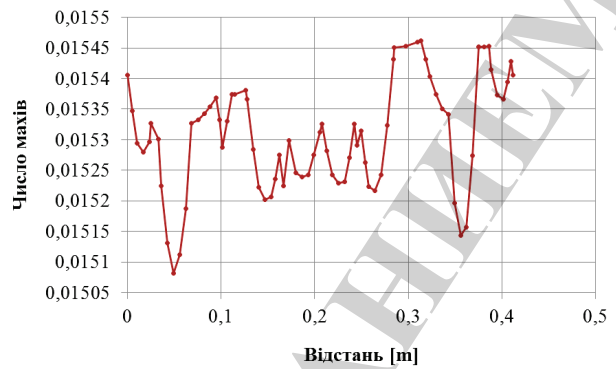


Рис. 8. Зміна числа махів лопотів генератора на виході технологічному тракту

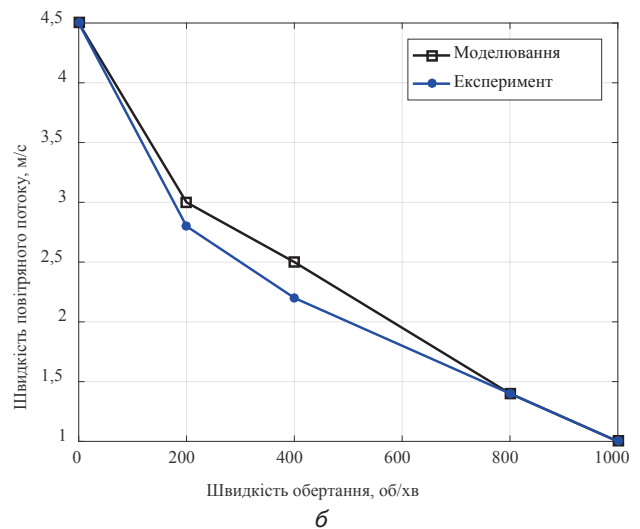
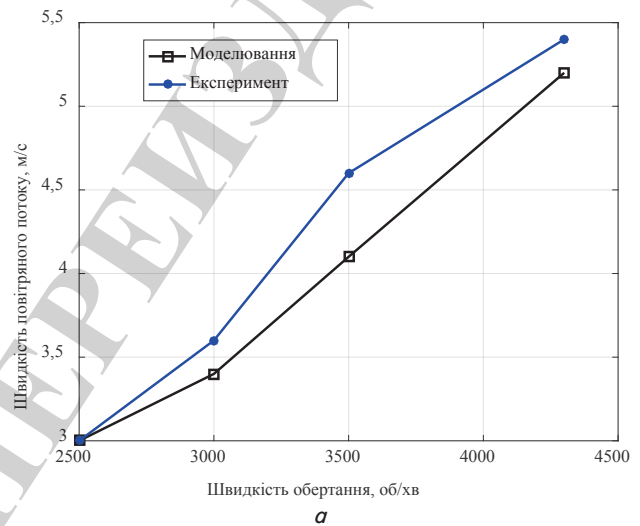


Рис. 9 Графіки зміни швидкості газоповітряного потоку в функції швидкості обертання лопотів гвинта вентилятора: а – на виході технологічному тракту; б – після гвинта генератора

Для отримання даних при роботі лабораторного стенду в технологічному тракту використаний вентилятор типу DeerCool GS120. В електроприводі вентилятора застосовується електродвигун постійного струму. Він має постійні магніти типу RK-370са-11490, напругу живлення 24 В, струм живлення 350 мА і швидкість обертання

валу 4300 об/хв. Повітряний потік нагнітається вентилятором у технологічний тракт діаметром 110 мм. Вироблення електричної енергії виконується генератором постійного струму з постійними магнітами типу RS-545ph. Робочий діапазоном генератора по напрузі складає від 32 В до 42 В, при струмі 0,04 А і швидкості 3940 рад/хв. У процесі роботи технологічного тракту акумулятор постійно заряджується від генератора. Навантаженням на акумулятор, при достатньому рівні напруги на його виводах, є електродвигун вентилятора.

## 6. Обговорення результатів дослідження процесу розподілу відпрацьованих газоповітряних потоків

Як показує аналіз (рис. 1, а), швидкість повітряного потоку на виході технологічного тракту є пропорційною функцією від потужності вентилятора. Розмір лопатей гвинта вентилятора впливає на швидкість повітряного потоку. Звідси слідує, що зі збільшенням розмірів лопатей гвинта збільшується вихідна потужність, при тій самій швидкості газоповітряного потоку. При швидкості від 11 до 42,5 м/с (рис. 1, б) перші дві моделі вентиляторів (ВМЭВО-5-15 та ВМЭВО-6-25) мають практично однакову продуктивність, тобто різниця в потужності, яку дає гвинт на виході при використанні цих моделей вентиляторів, незначна. Стосовно інших моделей (ВМЭВО-8-45, ВМЭВО-10-110 та ВМЭВО-12-110) зі змінною потужністю вентилятора збільшується і вихідна потужність повітряного потоку, проте різниця в продуктивності стає все більш помітною. Так, наприклад, на швидкості в 42,55 м/с вентилятор ВМЭВО-10-110 дає потужність у 3,5 рази більше, ніж попередня модель вентилятора. При дослідженні встановлено, що особливе значення мають розміри технологічного тракту: площа та довжина, які впливають на швидкість повітряного потоку. Для розрахунків взято декілька значень площі та довжини технологічному тракту та проведені розрахунки, використовуючи формули (2) і (3). Виходячи з графіків, що надані на рис. 1, б, в, встановлено, що чим більший діаметр та розміри лопаті гвинта вентилятора, тим більше значення потужності отримуємо на виході. При цьому габаритні розміри, діаметр і споживана потужність значно відрізняються. Варто зазначити, що на швидкості від 11 до 27 м/с різниці в потужності практично немає, незважаючи на різні розміри лопаті гвинта. У той же час при швидкості в 70 м/с спостерігаємо значну відмінність у потужності між вентиляторами при розмірах лопаті гвинта  $H=0,5$  і  $D=0,4$  і  $H=0,7$  і  $D=0,6$ , що свідчить про більш цілеспрямоване використання останньої. Аналізуючи залежності, що представлені на рис. 1, з, зроблено наступний висновок, що зі збільшенням довжини технологічного тракту швидкість повітряного потоку знижується. Варто відзначити, що чим більша довжина технологічному тракту, тим меншою стає різниця в швидкості між різними моделями вентиляторів. Таким чином, при довжині технологічного тракту від 7 до 9 метрів різниця в швидкості між різними моделями вентиляторів незначна, а при довжині в 9 метрів не перевищує 3–4 м/с.

Моделювання процесу розподілу повітряного потоку до і після гвинта генератора показує, як представлено на рис. 3, вплив повітряного потоку на роботу гвинта генератора більш ефективний на відстані 400 мм від виходу технологічному тракту.

Результати моделювання, що представлені на рис. 4, а, б, показують, що швидкість повітряного потоку на краю і середині діаметру технологічному тракту суттєво змінюється. При збільшенні швидкості обертання лопатей гвинта вентилятора 2500 об/хв до 4300 об/хв збільшується швидкість повітряного потоку (рис. 4, в).

Швидкість повітряного потоку на середині діаметру технологічному тракту незалежно від швидкості обертання лопатей гвинта вентилятора 2500 об/хв або 4300 об/хв мають значні коливання. Тиск повітря на виході технологічному тракту змінюється від краю діаметру до середини технологічному тракту (рис. 6). У залежності від швидкості потоку повітря змінюються температура повітря (рис. 7) і число махів лопатей гвинта генератора (рис. 8) на виході технологічному тракту.

Гідністю проведених досліджень є отримання розподілу газоповітряного потоку до і після гвинта генератора. Одне з труднощів, що стоять перед спробою розвинути це дослідження, було відсутність достатньої бази експериментальних установок для вивчення такого технологічного процесу. Це дало виявити суттєві зміни швидкості повітряного потоку на краю і середині діаметру на виході технологічному тракту. Встановлено, що коливання газоповітряного потоку змінюються від 0,16 % до 39 % по відношенню до середнього його значення. Результати досліджень показали, що при зміні швидкості обертання лопатей гвинта вентилятора в декілька разів при довжині технологічного тракту до 500 мм і діаметрі 110 мм швидкість газоповітряного потоку на виході змінюється пропорційно, а тиск залишається незмінним.

Недоліком дослідження є те, що дослідження виконані при використанні тільки однієї конфігурації технологічного тракту.

Отримані результати корисні для визначення оптимального місця розташування гвинта генератора у газоповітряному потоку для вироблення газоповітряною енергетичною установкою максимальної електричної енергії.

Дослідження по розподілу газоповітряного потоку на виході технологічного тракту виробничого обладнання раніше не проводились. У подальшому вдосконалення цього дослідження можливо в напрямку зміни конфігурації технологічного тракту.

## 7. Висновки

- Для отримання газоповітряною енергетичною установкою максимальної виробленої електричної енергії розроблена методика для розрахунків швидкості газоповітряного потоку при виході з технологічного тракту. Це дозволяє визначити оптимальне місце розташування гвинта генератора у робочій зоні технологічного тракту. Методика складається з фізичних рівнянь, що характеризують процеси газоповітряного тракту через закон збереження маси, має баланс тисків у вигляді системи диференціальних рівнянь для ділянки до і після гвинта генератора, що представляють газоповітряний тракт, як об'єкт регулювання. Використовуючи запропоновані фізичні рівняння, розраховані залежності швидкості повітряного потоку від вихідної потужності різних типів вентиляторів. Як показали результати дослідження, на місце розташування гвинта генератора впливає повітряний потік, що залежить від потужності вентилятора, змінюється впродовж діаметру технологічному тракту і є функціями



від діаметру та параметрів лопотів повітряного гвинта вентилятора і технологічному тракту. Коливання газоповітряного потоку на краю і середині діаметру технологічному тракту змінюються до 39 % по відношенню до середнього його значення. При зміні швидкості обертання лопотів вентилятора в декілька разів швидкість газоповітряного потоку на виході змінюється пропорційно, а тиск залишається незмінним.

2. Для аналізу розподілу газоповітряних потоків побудована математична модель. До складу моделі входять рівняння збереження маси, імпульсу і енергії нестационарної просторової течії у декартовій системі координат. Ця система обертається з кутовою швидкістю навколо осі, що проходить через її початок. У математичну модель входять рівняння кінетичної енергії турбулентності та дисипації цієї енергії. Комп'ютерне моделювання технологічного процесу розподілу газоповітряних потоків, що вивдаються вентилятором виробничої установки, виконано з використанням програмного середовища SolidWorks Flow Simulation. Розподіл газоповітряних потоків на виході з технологічного тракту до і після гвинта генератора виконано на відстані 400 мм ( $a$ ) і 1000 мм при його розташування від виходу технологічного тракту.

Використання моделі дозволило визначити зміни швидкості повітряного потоку після генератора на виході технологічного тракту в залежності від швидкості обертання вентилятора від 2500 до 4300 м/с. При цьому кількість лопотів гвинта на генераторі дорівнювала 11, а діаметр гвинта генератора – 110 мм.

3. На лабораторному стенді проведені експериментальні випробування. Дослідження дозволили перевірити на адекватність результати, що отримані при комп'ютерному моделюванні процесу нагнітання вентилятором повітряних потоків і їх розподіл на виході технологічного тракту. Зміна швидкості повітряного потоку на виході технологічного тракту, що отримана експериментально, найбільше відрізняється від результату моделі на 12 % при швидкості обертання лопотів вентилятора 3500 об/хв. Одночасно, після гвинта генератора цей параметр відрізняється тільки на 8 % при швидкості обертання лопотів вентилятора 400 об/хв. Експериментальні результати роботи ГПЕУ отримані з використанням SCADA системи. Для цього розроблена віртуальна модель у програмному середовищі LabVIEW і встановлена на ЕОМ. Через інтерфейс USB-2 лабораторний стенд з'єднується з ЕОМ.

#### Література

1. Энергетична стратегія України на період до 2030 року. Верховна Рада України, 2013. URL: <http://zakon1.rada.gov.ua/signal/kr06145a.doc>
2. Jones G., Bouamane L. Historical Trajectories and Corporate Competences in Wind Energy. Harvard Business School, 2011. 82 p. URL: [http://www.hbs.edu/faculty/Publication%20Files/11-112\\_05079f6f-9952-43fe-9392-71f3001ceae4.pdf](http://www.hbs.edu/faculty/Publication%20Files/11-112_05079f6f-9952-43fe-9392-71f3001ceae4.pdf)
3. Global Wind Energy Council: Data from the Global Wind Energy Council. URL: <http://www.gwec.net/index.php?id=125>
4. Сінчук О. М., Бойко С. М. Автономна вітроенергетичної установки для підземних гірничих виробок залізрудних шахт // Вісник Вінницького політехнічного інституту. 2014. № 1. С. 70–72.
5. Мацкевич П. Використання енергії вітру // ЕКОінформ. 2011. № 5. С. 36–38.
6. Щур І. З., Климко В. І. Техніко-економічне обґрунтування параметрів гібридної вітро- сонячної системи для електропостачання окремого об'єкта // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. 2014. № 2. С. 92–100.
7. Hybrid Wind/Solar Power Generation. The University of Texas at Austin. URL: <https://che.utexas.edu/>
8. Серебряков Р. А., Бирюк В. В. Энергопреобразователь, использующий низкопотенциальные воздушные, тепловые и гидравлические потоки // Вестник аграрной науки Дона. 2015. № 32. С. 83–88.
9. The electromagnetic transformer of mechanical energy into heat for wind turbine / Makarchuk O., Rusek A., Shchur I., Shchur V. // Przegląd Elektrotechniczny (ElectricalReview). 2015. Vol. 91, Issue 1. P. 179–182. doi: 10.15199/48.2015.01.40
10. Щур В. І. Математична модель турбулентного вітропотоку для комп'ютерного і фізичного моделювання роботи вітроустановок // Електромеханічні та енергетичні системи, методи моделювання та оптимізації. Матер. X Міжн. наук.-техн. конф. мол. учених і спец. м. Кременчук. Кременч. націон. ун-т ім. М. Остроградського, 2012. С. 199–200.
11. Operation and Power Flow Control of Multi-Terminal DC Networks for Grid Integration of Offshore Wind Farms Using Genetic Algorithms / Pinto R., Rodrigues S., Wiggelinkhuizen E., Scherrer R., Bauer P., Pierik J. // Energies. 2012. Vol. 6, Issue 1. P. 1–26. doi: 10.3390/en6010001
12. Long-term research challenges in wind energy – a research agenda by the European Academy of Wind Energy / Van Kuik G. A. M., Peinke J., Nijssen R., Lekou D., Mann J., Sørensen J. N. // Wind Energy Science. 2016. Vol. 1, Issue 1. P. 1–39. doi: 10.5194/wes-1-1-2016
13. Кузьо І. В., Корендій В. М. Обґрунтування розвитку вітроенергетичних установок малої та надмалої потужності // Вісн. Нац. ун-ту «Львів. політехніка». Оптимізація виробничих процесів і технічний контроль в машинобудуванні та приладобудуванні. 2010. № 679. С. 61–67.
14. Петренко Н. Ветрогенераторы малой мощности // Радиоаматор. 2013. № 7. С. 40–43.
15. Шихайлов М. О., Фаворский Ю. П. Особенности конструкций и использование ветроэнергетических установок малой мощности // Электрик. 2006. № 1-2. С. 29–31.
16. Соколовский Ю. Б., Соколовский А. Ю., Лимонов Л. Г. Повышение эффективности ветровых энергетических установок // Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит. 2014. № 9. С. 28–37.

17. Спосіб перетворення теплової енергії в механічну роботу в газотурбінній установці: Пат. № 15127 UA. МПК: F02C 6/18 / Дикий М. О., Жирицький О. Г., Яцкевич С. В., Кривуца В. А., Рудомьотов С. В., Романов В. І. та ін. № 93007304; заявл. 05.05.1993; опубл. 30.06.1997, Бюл. № 3. 4 с.
18. Тимофеев М. І., Семко Ю. М., Галанін Ю. М. Спосіб отримання електроенергії у метрополітені та пристрій для його здійснення: Пат. № 28997 UA. МПК: F03B 13/12, F03D 1/02, F01B 1/00. № 97115720; заявл. 28.11.1997; опубл. 16.10.2000, Бюл. № 5. 4 с.
19. Wind turbine control. University of Notre Dame. URL: [https://www3.nd.edu/~tcorke/w.WindTurbineCourse/WindTurbineControl\\_Presentation.pdf](https://www3.nd.edu/~tcorke/w.WindTurbineCourse/WindTurbineControl_Presentation.pdf)
20. Лобов В. Й., Лобова К.В., Донченко О. І. Автоматизоване керування турбомеханізмом // Гірничий вісник. 2017. № 102. С. 191–196.
21. Лобов В. Й., Лобова К. В., Попсуйко Н. В. Вітроенергетична установка для гірничого підприємства // Гірничий вісник. 2017. № 102. С. 199–203.
22. Пристрій для автоматичного керування електроспоживанням: Пат. № 109979 UA, МПК: H02J 13/00 / Чернюк М. С., Єфіменко Л. І., Тиханський М. П., Лобов В. Й. № 201600998; заявл. 08.02.2016; опубл. 26.09.2016, Бюл. № 18. 7 с.
23. Лобова К. В., Лобов В. Й., Даць А. В. Пристрій для автоматичного керування електроспоживанням технологічної установки: Пат. № 119021 UA. МПК: H02J 13/00. № u201701906; заявл. 27.02.2017; опубл. 11.09.2017, Бюл. № 17. 7 с.
24. Techno-economic analysis of a wind-solar hybrid renewable energy system with rainwater collection feature for urban high-rise application / Chong W. T., Naghavi M. S., Poh S. C., Mahlia T. M. I., Pan K. C. // Applied Energy. 2011. Vol. 88, Issue 11. P. 4067–4077. doi: 10.1016/j.apenergy.2011.04.042
25. Как рассчитать площадь сечения трубы. Трубы Гид. URL: <http://trubygid.ru/rasschitat-ploshhad-secheniya>
26. Ложечников В. Ф., Стопакевич А. А. Структура многомерной математической модели динамики барабанного котла средней мощности // Оптимизация управления, информационные системы и компьютерные технологии. Труды Украинской академии экономической кибернетики (Южный научный центр). 1999. № 1. С. 167–176.
27. Бойко Е. А., Деринг И. С., Охорзина Т. И. Аэродинамический расчет котельных установок. Красноярск: КГТУ, 2006. 71 с.
28. SolidWorks 2007/2008. Компьютерное моделирование в инженерной практике / Алямовский А. А., Собачкин А. А., Одинцов Е. В., Харитонович А. И., Пономарев Н. Б. СПб.: БХВ-Петербург, 2008. 1040 с.
29. Васильев А. Ю. Дослідження процесу обтікання корпусу МТ-ЛБ ударною хвилею // Вестник Нац. техн. ун-та «ХПИ». 2009. № 28. С. 5–12.
30. Волков К. Н., Емельянов В. Н. Моделирование крупных вихрей в расчетах турбулентных течений. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. 368 с.

ТОЛЬКО ДЛЯ

