

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ПОЛІСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

Факультет інженерії та енергетики
Кафедра механіки та інженерії агроєкосистем

Кваліфікаційна робота
на правах рукопису

Кудинський Анатолій Сергійович

УДК 664.72

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

**Розробка системи подачі вітрової енергії для примусового
конвективного сушіння зерна при низькій швидкості вітру**

208 “Агроінженерія”

Подається на здобуття освітнього ступеня магістр

кваліфікаційна робота містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

_____ Кудинський Анатолій Сергійович

Керівник роботи

Дерев'яно Д. А.

доктор технічних наук, професор

Житомир – 2020

АНОТАЦІЯ

Кудинський Анатолій Сергійович. Розробка системи подачі вітрової енергії для примусового конвективного сушіння зерна при низькій швидкості вітру. – Кваліфікаційна робота на правах рукопису.

Кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня магістра за спеціальністю 208 – Агроінженерія. – Поліський національний університет, Житомир, 2020.

Робота присвячена питанням розробки системи подачі вітрової енергії для примусового конвективного сушіння зерна при низькій швидкості вітру.

В роботі досліджуються можливості швидкого сушіння зерна в країнах, що розвиваються, за допомогою простої у складанні системи, яка використовує енергію вітру, і є ефективною для швидкого сушіння. Невеликий дешевий пристрій, який використовує енергію вітру, можна побудувати та ввести в дію безпосередньо на полі. Це дозволить дрібним фермерським господарствам здійснювати швидке сушіння своєї продукції.

Турбіна пройшла випробування в умовах змінної швидкості вітру в аеродинамічній трубці, що дозволило оцінити її ефективність.

Умови швидкості вітру для випробувань визначалися виходячи з середніх вітрових умов у північній частині України в липні, коли збирається основний урожай зерна.

Ключові слова: післяжнивні втрати, примусова конвекція, сушіння зерна, вітрова турбіна, вологість.

ANNOTATION

Kudinsky Anatoly Sergeevich. Development of wind energy supply system for forced convective drying of grain at low wind speed. – Qualification work on the rights of the manuscript.

Qualifying work for a master's degree in specialty 208 – Agricultural Engineering. – Polissya National University, Zhytomyr, 2020.

The work is devoted to the development of a wind energy supply system for forced convective drying of grain at low wind speeds.

The paper investigates the possibilities of fast drying of grain in developing countries with the help of an easy-to-assemble system that uses wind energy and is effective for fast drying. A small cheap device that uses wind energy can be built and put into operation directly in the field. This will allow small farms to quickly dry their products.

The turbine was tested under conditions of variable wind speed in the wind tunnel, which allowed to evaluate its efficiency.

Wind speed conditions for testing were determined based on average wind conditions in the northern part of Ukraine in July, when the main grain harvest is collected.

Key words: postharvest losses, forced convection, grain drying, wind turbine, humidity.

ЗМІСТ

Анотація.....	1
Вступ.....	4
Розділ 1. ПІСЛЯЖНИВНІ ВТРАТИ ЗЕРНА В УМОВАХ ТЕПЛОГО І ВОЛОГОГО КЛІМАТУ.....	7
Висновок до розділу 1.....	9
Розділ 2. РОЗРОБКА КОНСТРУКЦІЇ МАЛОЇ ВІТРОВОЇ ТУРБІНИ ДЛЯ МЕХАНІЧНОГО СУШІННЯ ЗЕРНА ПРИ НИЗКІЙ ШВИДКОСТІ ВІТРУ В ТЕПЛОМУ І ВОЛОГОМУ КЛІМАТІ.....	10
2.1. Загальна концепція проектування вітрової турбіни.....	10
2.2. Методика визначення характеристик потужності турбіни.....	13
Висновок до розділу 2.....	18
Розділ 3. РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ.....	19
3.1. Результати розрахунків вимог до потужності.....	19
3.2. Результати випробування вітрових роторів різних типів.....	22
3.3. Результати випробування ротора в аеродинамічній трубі.....	25
Висновок до розділу 3.....	27
ВИСНОВКИ.....	28
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	30
Додаток А.....	33

ВСТУП

Відсутність економічних сушарок зерна є серйозною проблемою для дрібних фермерських господарств в країнах, що розвиваються. Вартість складного обладнання для сушіння зерна та теплової або електричної енергії для швидкого сушіння зерна є основними факторами, що впливають на післяжнивні втрати, які були зафіксовані в більшості країн, що розвиваються.

За різними оцінками третина продовольства в світі втрачається на етапі від збирання до обробки. При цьому управління післязбиральною обробкою є критично важливим для контролю втрат.

На додаток до величезних втрат, які призводять до зубожіння фермерів з низькими доходами, погано висушене зерно з високим вмістом вологи є відмінним середовищем для зростання і поширення цвілі та інших патогенів в сприятливо-теплому і вологому кліматі. В результаті тривалого зберігання врожаю після збирання в теплому і вологому кліматі відбувається забруднення зернових культур токсичними пліснявими грибами та іншими патогенами. Забруднення такими патогенами вчені пов'язують зі збільшенням випадків раку печінки через канцерогенну дію мікотоксинів.

Вартість є основним фактором, що впливає на впровадження сільськогосподарських технологій дрібними фермерськими господарствами з низьким доходом.

Сушіння на відкритому повітрі залишається одним із основних методів сушіння зерна в країнах, що розвиваються. З цієї причини агентства з розвитку та дослідники рекомендують застосування відновлюваних джерел енергії [1–5]. Застосування вітроенергетичних систем для виконання різних сільськогосподарських завдань, таких як перекачування води і подрібнення зерна, було дуже поширеним явищем до сучасного виробництва електроенергії. Зниження використання вітрових пристроїв в сільськогосподарських цілях, як правило, пов'язане з розвитком електроенергії

і збільшенням використання вітрових турбін для вироблення електроенергії, з якої більшість інших механізмів живляться.

Поновлювані джерела енергії в основному безкоштовні і широко доступні (наприклад, вітер і сонячна енергія). Системи вітроенергетики є чистими джерелами енергії і можуть працювати в будь-який час доби, поки дме вітер. У країнах, що розвиваються, вартість особистого виробництва електроенергії для опалення і осушення відносно висока, тому необхідно звернути увагу на потенціал безкоштовної та відновлюваної енергії, такої як сонячна та енергія вітру.

Відоме застосування новітніх технологій сушіння, які ще не набули широкого поширення. Деякі з поширених інновацій включають використання сонячних осушувачів з примусовою конвекцією або без неї. Коли мова йде про примусову конвекцію, для живлення вентиляторів широко використовуються фотоелектричні модулі, що збільшує вартість технології. Коли примусова конвекція відсутня, швидкість видалення вологи з сушильної камери знижується і часто відбувається конденсація вологого повітря з вже висушеним зерном, що призводить до неефективного і більш тривалого сушіння [6]. Тривалий час сушіння зерна з високим вмістом вологи в мезофільних умовах призводить до збільшення ризику зростання цвілі і забруднення зерна токсигенними метаболітами цвілі.

В даній роботі досліджуються можливості моделювання швидкого сушіння зерна в країнах, що розвиваються, за допомогою простої у складанні системи, яка використовує енергію вітру, і є ефективною для швидкого сушіння. Невеликий дешевий пристрій, який використовує енергію вітру, можна побудувати та ввести в дію безпосередньо на полі. Це дозволить дрібним фермерським господарствам здійснювати швидке сушіння своєї продукції. Використання енергії вітру крім зниження експлуатаційних витрат дозволить знизити залежність селян від енергії згорання і пов'язаних з цим викидів вуглецю. Таким чином, як з економічної, так і з екологічної точки зору – це надійний спосіб скорочення післяжнивних втрат.

Мета і задачі дослідження. *Мета дослідження* – розробити систему подачі вітрової енергії для примусового конвективного сушіння зерна в теплому і вологому кліматі з низькою швидкістю вітру.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі **завдання**:

- обґрунтувати доцільність розробки економічної і простої у використанні вітрової системи примусового конвективного сушіння зерна в умовах теплового і вологого клімату із низькою швидкістю вітру;
- розробити загальну концепцію вітрової системи сушіння зерна;
- визначити раціональну конструкцію вітрового ротору;
- розробити методику визначення характеристик потужності вітрового ротору.;
- провести розрахунок вимог до потужності вітрової турбіни;
- провести експериментальні дослідження для визначення ефективності вітрової турбіни при різних значеннях швидкості вітру.

Об'єкт дослідження: процес сушіння зерна пшениці озимої.

Предмет дослідження: взаємозв'язок кліматичних умов та основних технічних характеристик системи подачі вітрової енергії для примусового конвективного сушіння зерна.

Методи дослідження: дослідження виконано з використанням методів механіки, теплотехніки та аеродинаміки. Експериментальні дослідження проведено із застосуванням методів теорії імовірності, математичної статистики.

Розділ 1

ПІСЛЯЖИВНІ ВТРАТИ ЗЕРНА В УМОВАХ ТЕПЛОГО І ВОЛОГОГО КЛІМАТУ

В роботах [7, 8] було зазначено, що відсутність доступу до якісних систем сушіння зерна в країнах з теплим і вологим кліматом є головним чинником, що впливає на щорічну втрату зерна і зменшення його цінності. Підвищена швидкість біохімічних реакцій при мезофільних температурах призводить до супутнього зростання і забруднення зерна канцерогенними, тератогенними, і мутагенними метаболітами цвілі, такими як афлатоксин [9]. Неefективне сушіння зерна призводить до втрати його якості і руйнує торговий потенціал сільськогосподарських підприємств.

У деяких випадках зараження зерна токсичними метаболітами призводить до епідемій, які викликають смерті людей. Дослідники, які вивчали вплив контамінації афлатоксином в деяких країнах Африки [10], заявили, що споживання 20...120 мікрограмів афлатоксину (поширеного мікотоксину) на кілограм маси тіла людини протягом періоду від 1 до 3-х тижнів пов'язане з гострим афлатоксикозом, який за повідомленнями привів до смертей в цьому регіоні. У деяких країнах, таких як Кенія, ці епідемії стали досить поширеними, що призвело до посилення стурбованості з приводу якості управління зерном в регіоні після збору врожаю. Епідеміологічні дані [11] також показують, що в глобальному масштабі 83% зареєстрованих випадків раку печінки відбуваються в країнах, що розвиваються, і визнають різні фактори ризику, включаючи вплив афлатоксину з їжею [12].

Як правило, погіршення якості зерна є результатом неправильного зберігання, наприклад сушіння, і тривалого впливу на механічно пошкоджені зерна шкідливої мікрофлори, а також шкідників і забруднюючих речовин. Зниження цінності зерна в країнах, що розвиваються, з теплим і вологим кліматом також тісно пов'язане з екологічною схильністю, коли збір врожаю відбувається в сезон сильних дощів і високих температур. Ці умови вимагають

радикального підходу для швидкого сушіння зерна, зібраного з високим (>17%) вмістом вологи. У період високої температури навколишнього середовища (25...35 °С) і відносної вологості (>70 %) неможливість швидкого сушіння є причиною втрат після збору врожаю.

Практика, яка передбачає швидке зниження вологості зерна до рівня нижче 15% протягом 48 годин [13], необхідна в теплих і вологих кліматичних умовах як засіб запобігання псуванню зерна при мезофільних температурах. Наприклад, виділення афлатоксину зростає в діапазоні температур від 20 °С до 38 °С з максимальним виділенням токсину при 27 °С [14]. Під час основних місяців збирання зерна з липня по серпень температура навколишнього середовища в Україні знаходиться в діапазоні 18...25 °С, а відносна вологість на півночі країни часто перевищує 65 %. Це показує, що такий клімат сприяє розмноженню мікофлори, а отже, псування і забруднення харчових продуктів з високим вмістом вологи є небезпечним в таких кліматичних умовах.

Дослідники і зацікавлені сторони припустили, що потенційні технічні рішення щодо сушіння зерна для фермерів країн, що розвиваються, вимагають економічної ощадливості. Деякі потенційні розробки повинні бути економічно доступними фермерам з низькими доходами. Іншими словами, технології, які будуть затребуваними в країнах, що розвиваються, повинні бути не тільки прийнятними з економічної точки зору, але також включати інновації [15–17].

ВИСНОВОК ДО РОЗДІЛУ 1

Виконаний аналіз свідчить, що дрібні фермерські господарства країн, що розвиваються, із вологим і теплим кліматом потребують впровадження дешевих і простих систем сушіння зерна. Це дасть змогу зменшити післяжнивні втрати зерна, зберегти його якість шляхом запобігання його зараженню токсичними метаболітами.

Така розробка була б корисною для сільського господарства України, оскільки клімат України в період збору зерна сприяє розмноженню токсичної мікрофлори.

РОЗДІЛ 2

РОЗРОБКА КОНСТРУКЦІІ МАЛОЇ ВІТРОВОЇ ТУРБІНИ ДЛЯ МЕХАНІЧНОГО СУШІННЯ ЗЕРНА ПРИ НИЗКІЙ ШВИДКОСТІ ВІТРУ В ТЕПЛОМУ І ВОЛОГОМУ КЛІМАТІ

Використання вітрових систем для сушіння зерна в невеликих фермерських господарствах і на рівні домашніх господарств стає все більш актуальним для вирішення проблеми післяжнивних втрат, особливо в країнах, що розвиваються, де доступ до надійної енергетичної інфраструктури відсутній або обмежений, а вартість виробництва електроенергії для фермерів є високою. В Україні близько 30 % зібраного зерна щорічно втрачається через неефективне сушіння [18]. Крім фізичної втрати врожаю, основні продукти зерна при зборі врожаю схильні до хвороботворної токсигенної цвілі та інших патогенів, якщо адекватне сушіння не виконується відразу після збору врожаю.

2.1. Загальна концепція проектування вітрової турбіни

Ідея дослідження полягала в тому, щоб побудувати багатолопатову дерев'яну турбіну з регульованим кроком і горизонтальною віссю, діаметр якої може бути збільшений за рахунок багат шарового каскадування. Ця турбіна буде проходити випробування в умовах постійної швидкості вітру в аеродинамічній трубі. Тому при проектуванні ротора турбіни частково враховувалися розрахунки вихідної потужності, а частково – обмежена пропускна здатність випробувальної аеродинамічної труби для дослідження в сталому режимі для оцінки фактичної вихідної потужності.

Концепція експериментальної вітрової турбіни для сушіння зерна в польових умовах полягає в тому, що ротор турбіни встановлюється на вищій висоті не менше 10 метрів від поверхні землі на відкритих

сільськогосподарських ділянках. Конічна зубчаста косозуба передача (рис. 2.1) передає крутний момент вниз по башті через вал, який з'єднаний з механічним приводом вентилятора.

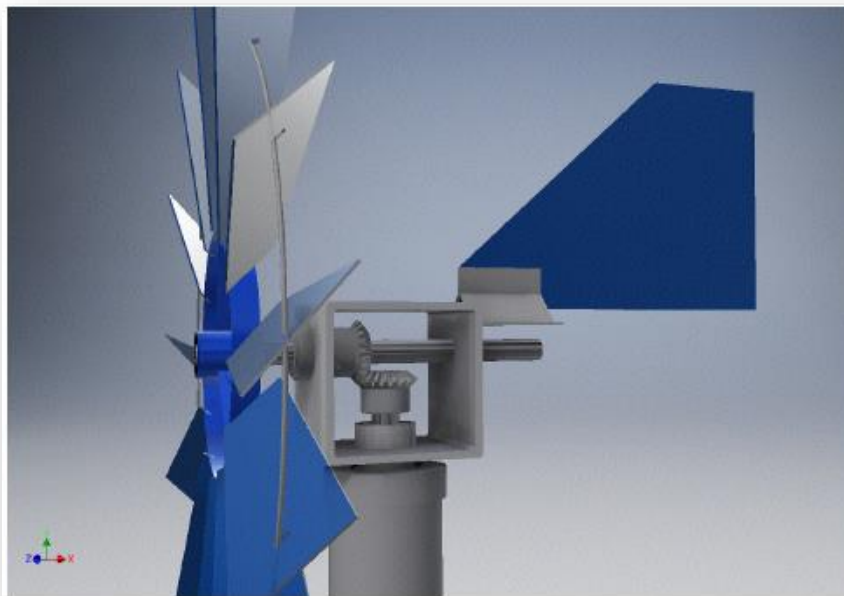


Рис. 2.1. Тривимірна візуалізація конструкції трансмісії

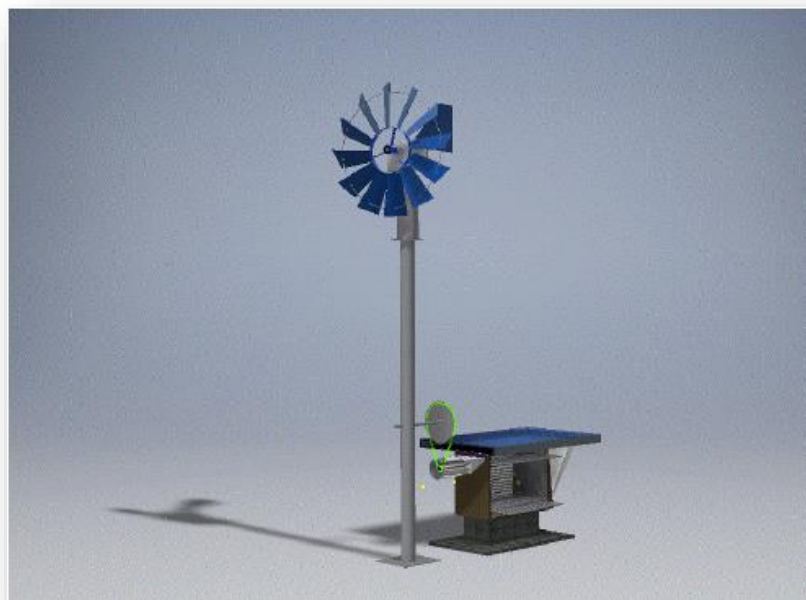


Рис. 2.2. Загальна концепція вітрової турбіни для механічного примусового конвективного сушіння зерна

На рис. 2.2 показана первинна концепція повномасштабної турбіни з великим допуском на модифікації в залежності від типу передавального пристрою (шестерні, ремінь, привід), типу сонячного колектора і сушильної камери.

Умови швидкості вітру для випробувань визначалися виходячи з середніх вітрових умов в північній частині України в липні, коли збирається основний урожай зерна. Була встановлена нижня межа 2,5 м/с і верхня межа 5,5 м/с.

На рис. 2.3 показаний проект прототипу конструкції 12-лопатевого ротора вітрової турбіни з коркового дерева з регульованим кроком лопатей і змінним їх числом, що підходить для випробування потенційної потужності при різних умовах швидкості вітру.

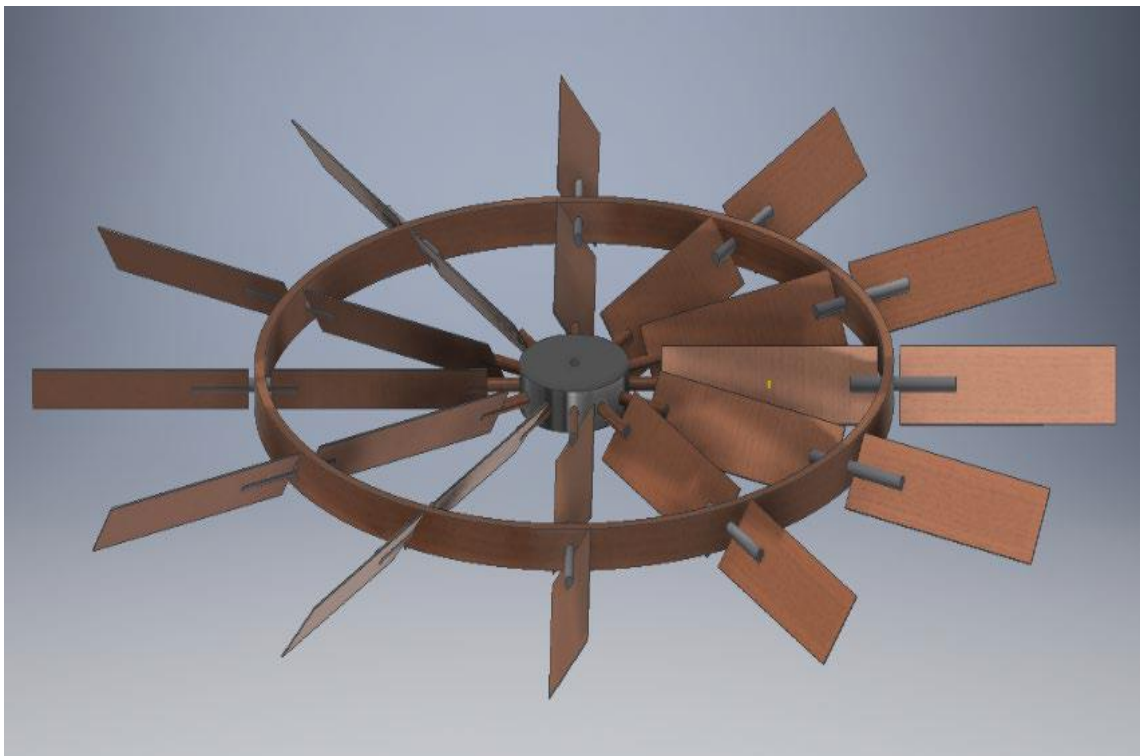


Рис. 2.3. Ротор зі змінним кроком лопатей

2.2. Методика визначення характеристик потужності турбіни

Потужність турбіни визначається розрахунками, які починаються з визначення кількості зерна, яке має регулярно сушитися в дрібному фермерському господарстві. Цей розрахунок є першим серед ряду послідовних розрахунків. Якщо на якомусь етапі розрахунку змінюється будь-який із вхідних параметрів, вся процедура зміниться.

Кількість вологи x_3 , яку необхідно видалити із зерна при початковому вмісті вологи M_1 , заданому вмісті вологи M_2 і масі x_1 зерна (кг).

$$x_3 = (M_1/100 \cdot x_1) - [(M_2/100) \cdot (x_1 - (M_1/100) \cdot x_1) / (1 - (M_2/100))]. \quad (2.1)$$

Також необхідно розрахувати кількість повітря, яке необхідне для видалення x_3 кг вологи із зерна. Оскільки повітря з різною відносною вологістю і температурою має різну здатність вбирати вологу, то щоб визначити скільки вологи буде в кожному кілограмі повітря при певній температурі і відносній вологості використовується психрометрична діаграма.

Психрометрична діаграма (ID-діаграма) відображає ряд залежностей, які необхідні для визначення умов сушіння, а саме: взаємозв'язок вологості повітря з температурою повітря, вологоємністю, питомою ентальпією суміші повітря-вода та парціальним тиском.

Зерно пшениці озимої було обране в якості досліджуваної культури, оскільки воно є одним з найбільш оброблюваних в країні. В Україні основний урожай пшениці озимої припадає на липень, коли відносна вологість навколишнього середовища становить від 48 до 70%, а середня температура навколишнього середовища знаходиться в діапазоні від 18 до 25 °C. Аналіз психрометричної діаграми, показаної на рисунку 2.4, показує, що навколишнє повітря при 23 °C і відносній вологості 70% має співвідношення змішування 0,015 кг вологи на 1 кг сухого повітря і 0,016 кг вологи на 1 кг сухого повітря при насиченні.

Це говорить про те, що повітря в таких умовах навряд чи буде сильно сушити. Отже, для зниження відносної вологості рекомендується нагрівати повітря сонячними променями, а підвищення температури повітря на 10 °С було застосоване в ряді сонячних сушарок, про які повідомлялося в літературі. Тому критерії проектування, засновані на умовах навколишнього середовища, визначені як 23 °С, 70% відповідно для температури і відносної вологості навколишнього середовища і підвищення температури на 10 °С з використанням сонячного теплового колектора. В результаті відносна вологість повітря знижується приблизно до 43% при підвищенні температури до 33 °С. Початкове співвідношення вологості повітря і вологоємності сухого повітря в міру наближення до насичення використовується для оцінки того, скільки повітря потрібно для видалення вологи з сільськогосподарської продукції в реальних психрометричних умовах.

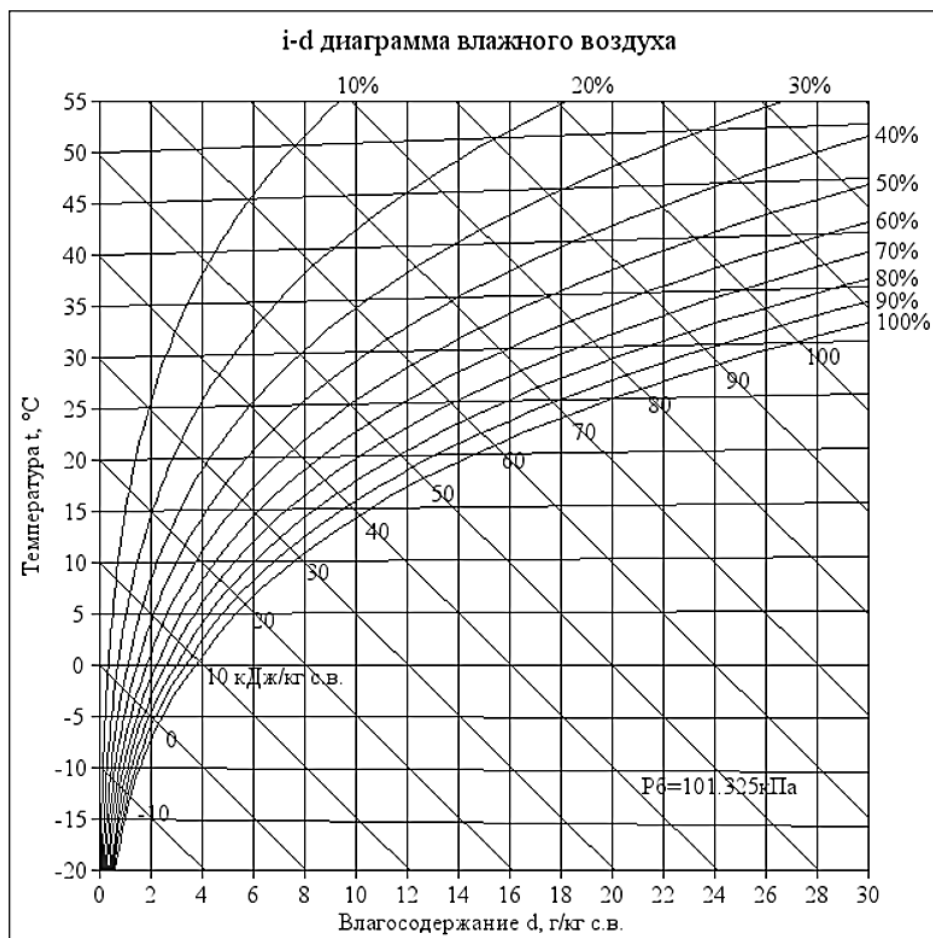


Рис. 2.4. Психрометрична діаграма, що показує зниження відносної вологості при підвищенні температури повітря

Кількість повітря в кілограмах, необхідна для належного сушіння, була обчислена з використанням психрометричних властивостей повітря при певних умовах навколишнього середовища. Різниця між співвідношенням вологості повітря при температурі сушіння і співвідношенням вологості при температурі по вологому термометру або по лінії насичення визначає кількість вологи на одиницю маси повітря, яке повітрям видаляється.

Загальна маса повітря необхідна для видалення всієї вологи з зерна, була обчислена шляхом множення зворотної різниці співвідношень вологості на загальну кількість вологи, що видаляється.

Після визначення необхідної кількості повітря час сушіння буде визначатися або виходячи з швидкості сушіння продукту в певних психрометричних умовах, або необхідно прийняти рішення про те, як довго буде тривати сушіння. Розділивши загальний об'єм повітря, необхідний для сушіння на кількість годин, необхідних для сушіння, отримується мінімальна швидкість сушіння.

Тиск насиченої пари повітря p_n при температурі T_n оцінювали за формулою [19]:

$$p_n = (-1,547411 + 0,1886945) \cdot T_n + 0,0049126 (T_n - 25,0002)^2 + 7,3617 \times 10^{-5} (T_n - 25,0002)^3 + 6,177 \times 10^{-7} (T_n - 25,0002)^4 \quad (2.2)$$

Коефіцієнт вологості ϕ оцінюється співвідношенням:

$$\phi = 622 p_n \cdot p_a / (\phi_1 / \phi_2 - p_n \cdot p_a), \quad (2.3)$$

де p_n – тиск насиченої пари (в десяткових дробах); p_a – атмосферний тиск; ϕ_1 / ϕ_2 – співвідношення вологостей.

Інші параметри включають визначення відповідної швидкості повітряного потоку для адекватного видалення вологи, що призводить до визначення необхідної потужності вентилятора для ефективного видалення вологи.

Після розрахунку фактичних вимог до потужності проводиться попереднє визначення розмірів ротора для забезпечення необхідної вихідної потужності P_p :

$$P_p = \frac{1}{2} \rho \pi r^2 \vartheta^3 K_{\text{КД}} \quad (2.4)$$

де $K_{\text{КД}}$ – коефіцієнт корисної дії турбіни, ρ – густина повітря, кг/м^3 , r – радіус ротора, ϑ – швидкість вітру, м/с .

Товщина шару зерна визначалася виходячи з розмірів сушильного бункера і маси зібраного зерна, яку необхідно висушити, та із врахуванням його об'ємної щільності. Глибину насипу зерна визначали за рівнянням:

$$H = \frac{m}{\rho_n \cdot l \cdot c} \quad (2.5)$$

де H – глибина насипу зерна (м), m – маса зерна (кг), зібраного для сушіння, ρ_n – насипна щільність (кг/м^3), l і c – довжина і ширина сушильного бункера (м).

Статичний тиск – величина опору потоку повітря по об'єму зерна, оцінюється за допомогою рівняння:

$$\frac{\Delta p}{H} = \frac{a \cdot \vartheta^2}{\log_e(1 + b \vartheta)} \quad (2.6)$$

де $\Delta p/H$ ($\text{Па} \cdot \text{м}^{-1}$) – падіння тиску на одиницю глибини H (м), ϑ – швидкість повітря (м/с) або об'ємна витрата на одиницю площі ($\text{м}^3 \cdot \text{с}^{-1} \text{ м}^{-2}$).

Повний перепад тиску в масі визначається множенням $\Delta p/H$ на глибину матеріалу в бункері. a і b – константи для конкретного продукту, які для зерна становлять $1,04 \times 10^4$ (Па·с²/м³) і 325 (м²·с/м³) відповідно [20].

Потужність, необхідна вентилятору для забезпечення належного сушіння, розраховується за формулою:

$$N_p = p \cdot Q / 63,43 \cdot K_{кд}, \quad (2.7)$$

де N_p – це необхідна потужність вентилятора, p – це повний тиск в повітряному потоці, а Q – об'ємна витрата повітря, що подається вентилятором для сушіння, $K_{кд}$ – відносний коефіцієнт корисної дії вентилятора.

Була розрахована необхідна потужність вентилятора для сушіння 100 кг зерна.

Для вимірювання крутного моменту на обертовому валу був використаний гальмівний динамометр.

Для того, щоб визначити потужність на валу, виміряну силу множать на відстань від зчеплення гальмівної системи до центру обертового валу, щоб отримати крутний момент на валу. Крутний момент $M_{кр}$, помножений на частоту обертання n (об/хв) вала, поділений на константу (9549), дає потужність N (Вт) в турбіні, як показано рівнянням (2.8):

$$N = \frac{M_{кр} \cdot n}{9549}. \quad (2.8)$$

Аеродинамічна потужність може бути виміряна як чиста вихідна потужність системи при використанні електричного генератора для вимірювання вихідної електричної потужності турбіни. Однак аеродинамічна потужність не враховує всіх втрат (наприклад, втрати в повітроводі). Тому середня швидкість повітряного потоку через точку в повітроводі (через яку механічний повітряний насос або вентилятор, що приводиться в дію турбіною,

нагнітає повітря) вимірюється з використанням відповідних інструментів, таких як калібрований датчик швидкості вітру або витратомір. Якщо діаметр або площа поперечного перерізу повітроводу відомі, то загальний повітряний потік через трубу в секунду може бути визначений з використанням відповідного пристрою вимірювання тиску, такого як трубка Піто або калібрований датчик тиску. Щоб визначити загальний тиск, поки вентилятор працює на повну потужність при кожній швидкості вітру, випускний отвір бункера було закрито до тих пір, поки датчик потоку в камері статичного тиску не зафіксував нульову швидкість потоку (іншими словами, весь динамічний тиск було перетворено в статичний тиск).

$$\text{Потужність (кг}\cdot\text{м}^2\text{/с}^3\text{)} = \text{об'єм потоку повітря (м}^3\text{/с)} \times \text{загальний тиск (кг/м}^2\text{)} \quad (2.9)$$

ВИСНОВОК ДО РОЗДІЛУ 2

Було розроблено загальну концепцію вітрової турбіни для механічного примусового конвективного сушіння зерна, а також описано методику визначення характеристик потужності вітрової турбіни.

Швидкість вітру в північному регіоні знаходиться в межах діапазону «низької швидкості вітру» від 2 до 5 м/с. Таким чином, потрібно виконати експериментальні дослідження для визначення раціональної конструкції ротора та підтвердження можливостей вітрових систем для механічного сушіння зерна.

Розділ 3

РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

3.1. Результати розрахунків вимог до потужності

Були проведені розрахунки для визначення потреби в потужності для примусового конвективного сушіння 100 кг зерна пшениці в кліматі із середньою температурою навколишнього середовища 23 °С і відносною вологістю до 80%. Передбачається, що температура повітря піднімається на 10 °С над температурою навколишнього середовища при використанні сонячного нагріву, що призводить до зниження відносної вологості до 40% і 44%. Відповідно, гірші умови сушіння відбуваються при 23°С і відносній вологості навколишнього середовища 80%, коли сонячне проміння відсутнє, а найкращі умови сушіння виникають при 33°С і відносній вологості 40%, коли досягається верхнє підвищення сонячної температури, а відносна вологість навколишнього середовища з 80% знижується до 40%. Розрахунки проводилися для сушіння протягом 2 і 4 днів, при цьому передбачається, що початковий вміст вологи значно знизиться протягом перших двох днів, але до стану тривалого зберігання він знизиться протягом 4 днів. В таблиці 3.1 наведені значення, отримані за допомогою розрахунків.

Таблиця 3.1

Вимоги до потужності вентилятора (Вт) для ефективного сушіння 100 кг зерна пшениці озимої від вмісту вологи 24% до 14%

Температура повітря, °С	Два дні				Чотири дні			
	Відносна вологість повітря, %							
	40	45	70	80	40	45	70	80
23	0.63	8.67	100.75	424.01	0.9364	1.342	14.95	61.77
33	1.64	2.42	35.27	178.2	0.2643	0.386	5.317	26.23

З таблиця 3.1 впливає, що для роботи з повітрям з більш високою відносною вологістю і низькою температурою протягом коротшого періоду часу потрібна максимальна потужність 424 Вт. Ті ж умови для 4 днів сушіння обумовлюють зменшення споживання енергії – 62 Вт. Підвищення температури повітря призводить до зниження відносної вологості, таким чином кондиціоноване повітря має більшу здатність вбирати вологу, споживана потужність знижується між температурами 23 і 33 °С в усіх напрямках.

Діапазон швидкості вітру було визначено з посиланням на середні вітрові умови на півночі України в період з липня по серпень, коли відбувається великий урожай зернових. Були встановлені нижня межа 2,5 м/с і верхня межа 5,5 м/с, а розрахункова продуктивність була встановлена в якості діапазону розрахункових випробувань.

Таблиця 3.2

Вимоги до радіусу вітрогенератора для забезпечення необхідної потужності
вентилятора при різній швидкості вітру

2 дні сушіння									
Температура, °C	Відносна вологість, %	Радіус турбіни, м							
		Швидкість вітру, м/с							
		2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0	5.5	6.0
23	40	1.29	0.98	0.78	0.64	0.53	0.46	0.40	0.35
	45	1.55	1.18	0.94	0.77	0.64	0.55	0.48	0.42
	70	5.28	4.02	3.19	2.61	2.19	1.87	1.62	1.42
	80	10.84	8.25	6.54	5.36	4.49	3.83	3.32	2.92
Температура, °C	Відносна вологість, %	Швидкість вітру, м/с							
		Швидкість вітру, м/с							
		2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0	5.5	6.0
33	40	0.67	0.51	0.41	0.33	0.28	0.24	0.21	0.18
	45	0.82	0.62	0.49	0.40	0.34	0.29	0.25	0.22
	70	3.13	2.38	1.89	1.54	1.29	1.11	0.96	0.84
	80	7.03	5.35	4.24	3.47	2.91	2.48	2.15	1.89
4 дні сушіння									
Температура, °C	Відносна вологість, %	Швидкість вітру, м/с							
		Швидкість вітру, м/с							
		2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0	5.5	6.0
23	40	0.51	0.39	0.31	0.25	0.21	0.18	0.16	0.14
	45	0.61	0.46	0.37	0.30	0.25	0.22	0.19	0.16
	70	2.04	1.55	1.23	1.01	0.84	0.72	0.62	0.55
	80	4.14	3.15	2.50	2.04	1.71	1.46	1.27	1.11
Температура, °C	Відносна вологість, %	Швидкість вітру, м/с							
		Швидкість вітру, м/с							
		2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0	5.5	6.0
33	40	0.27	0.21	0.16	0.13	0.11	0.10	0.08	0.07
	45	0.33	0.25	0.20	0.16	0.14	0.12	0.10	0.09
	70	1.21	0.92	0.73	0.60	0.50	0.43	0.37	0.33
	80	2.70	2.05	1.63	1.33	1.12	0.95	0.83	0.73

3.2. Результати випробування вітрових роторів різних типів

У дослідженні було випробувано чотири невеликі вітрові ротори (радіус 0,35 м), щоб визначити їх найбільш доцільні конструкції.

На рис. 3.1 показані випробувальні ротори на етапі попереднього дослідження. Кожний з роторів був випробуваний на вихідну потужність з використанням динамометра із зубчастим гальмом та каліброваним датчиком навантаження для оцінки крутного моменту. Калібрований блок вентиляторів використовувався для визначення швидкості вітру, а тахометр визначав частоту обертання турбіни.

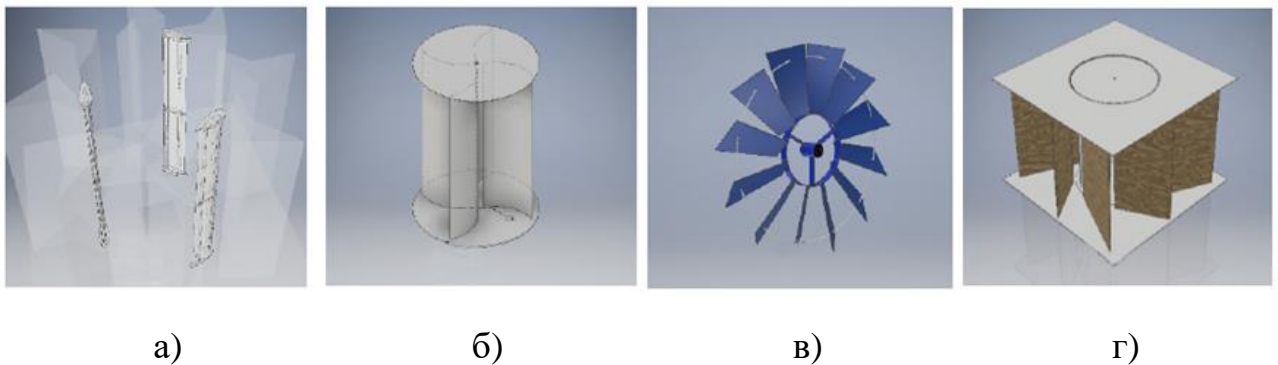


Рис. 3.1. Ескізи вітрових роторів з вертикальними і горизонтальними осями обертання:

- а) 3-лопатева турбіна з вертикальною віссю 0,6 м (1),
- б) 4-лопатева турбіна з вертикальною віссю 0,6 м (2),
- в) 12-лопатева вітряк з горизонтальною віссю 0,6 м (3),
- г) закрыта чотирилопатева турбіна з вертикальною віссю (4)

Конструкція ротора 4 з кожухом ґрунтується на принципі Бернуллі і рівнянні нерозривності, згідно з яким звужений або воронкоподібний канал зазвичай збільшує швидкість потоку рідини. В ході випробувань ротор 2 (рис.

3.1, б) і закрита версія ротора 4 (рис. 3.1, г) показали невисокі вихідну потужність і частоти обертання.

На рис. 3.2 показаний графік вимірної потужності при різній швидкості вітру для кожного з чотирьох тестованих вітрових роторів. На рис. 3.3 показані графіки середньої частоти обертання для кожного з пристроїв.

Низька потужність ротора 2 виявилася несподіваною, враховуючи, що турбіни Savonius з приводом від опору використовують тільки половину своєї спільної робочої площі для прямої тяги, в той час як друга половина є надмірною і може бути фактично контрпродуктивною для поганоспроекттованих турбін. Характеристики потужності для ротора 4 передбачають високу турбулентність усередині корпусу, яка знижує ефективність турбіни.

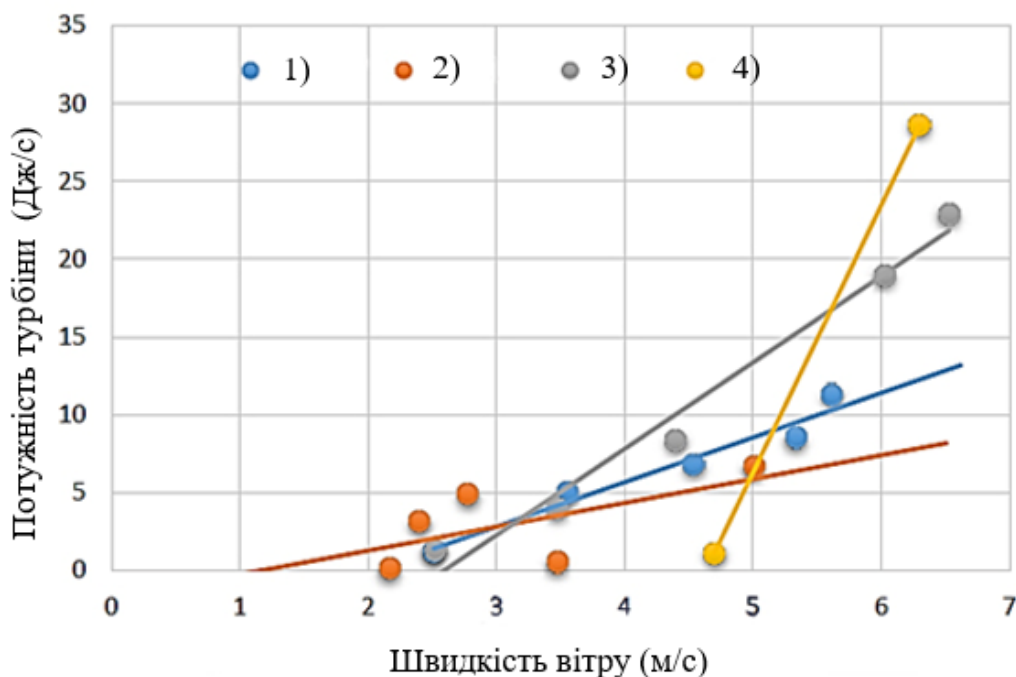


Рис. 3.2. Потужність роторів досліджуваних конструкцій при різній швидкості вітру

Незадовільна робота трилопатевого ротора 1 при низькій швидкості вітру (рис. 3.3), робить його непридатним для експлуатації в зонах, де швидкість вітру часто нижче 5 м/с.

12-лопатевий ротор 4 показав кращий результат потужності в режимі швидкості вітру від 2,5 до 5,5 м/с. Його частота обертання залишається стабільно вище всіх інших типів турбін, як показано на рис. 3.3.

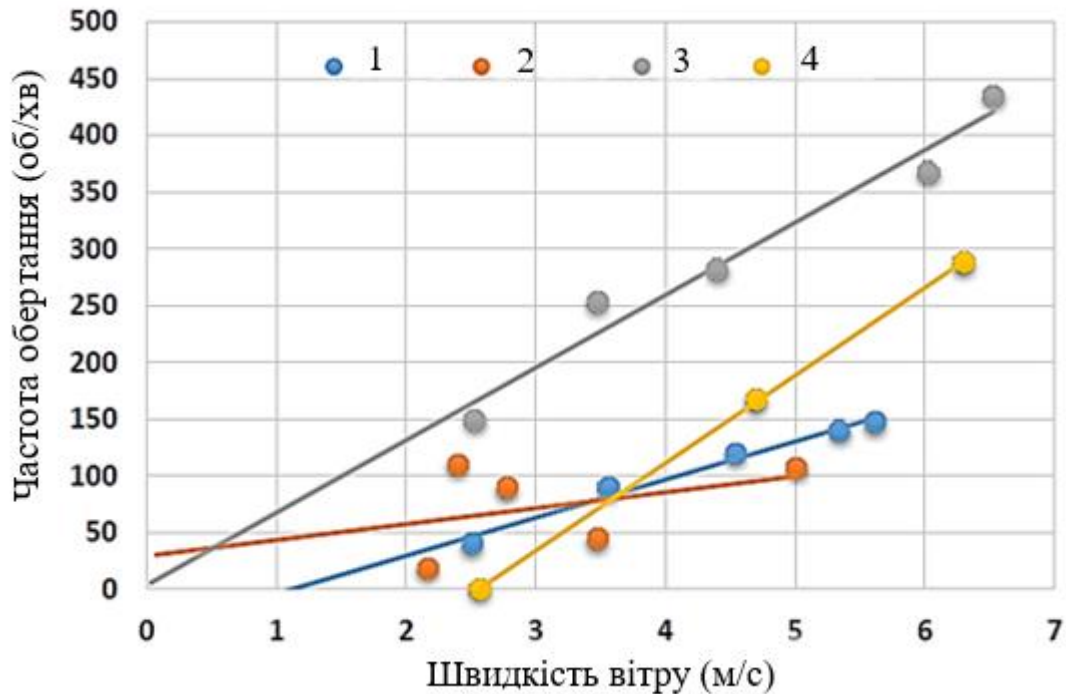


Рис. 3.3. Частота обертання роторів досліджуваних конструкцій при різних швидкостях вітру

Беручи до уваги більш високу потужність і частоту обертання 12-лопатевого ротора з горизонтальною віссю, саме він був обраний для подальшого експериментального дослідження.

12-лопатевий ротор радіусом 0,35 м з постійним і регульованим кроком лопатей був виготовлений з деревини бальсу і випробуваний в аеродинамічній трубі (1,2 x 1,2 м) (рис. 3.4).



Рис. 3.4. Налаштування ротора (а) та випробування в аеродинамічній трубі (б)

3.3. Результати випробування ротора в аеродинамічній трубі

В таблиці 3.3 наведені характеристики примусової конвекції турбіною з вентилятором при різних умовах швидкості вітру, що отримані під час експериментальних досліджень. Можна відзначити тенденцію збільшення потужності від $0,37 \pm 0,02$ Вт при швидкості вітру $1,9 \pm 0,01$ м/с до $5,98 \pm 0,20$ Вт при швидкості $5,6 \pm 0,03$ м/с. Однак загальна ефективність системи (вихідна конвективна потужність поділена на потужність вітру) збільшилася з $6,42\% \pm 0,30$ при нижніх межах швидкості вітру в дослідженні досягнувши піку близько $8,61\% \pm 0,32$ при швидкості вітру близько $3,5 \pm 0,02$ м/с, після чого вона поступово знижується до мінімуму $4,2\% \pm 0,07$ при швидкості вітру $5,6 \pm 0,03$ м/с. Ця тенденція показала, що вітрова турбіна більш пристосована для роботи в середньому діапазоні досліджуваної швидкості вітру (від 2,5 до 5,5 м/с). Це спостереження додатково підтверджує ідею про те, що вітрові системи з декількома лопатями краще працюють при умовах з низькою швидкістю вітру. Це так само пояснює низьке вироблення електроенергії, що виникає при використанні електричного генератора для перевірки ефективності вітрової турбіни, як показано на рисунку 3.9.

Також існує ймовірність того, що зниження ефективності аерації при середній швидкості вітру може означати, що вентилятор, який використовує потужність турбіни, досяг своєї пікової потужності.

Таблиця 3.3

Характеристики турбіни діаметром 1,4 м при різних умовах швидкості вітру

Швидкість вітру в тунелі, м/с	Напірний тиск, Па	Швидкість повітря в повітроводі, м/с	Площа поперечного перерізу бункера, м ²	Об'ємна витрата повітря, м ³ /с	Потужність аерації, Вт	Потужність вітру, Вт	Потужність турбіни, Вт	Ефективність, %
5.6±0.03	11.54±0.38	1.8	0.288	0.52	5.98±0.20	142.54±1.57	2.016	4.2±0.07
5.4±0.02	11.46±0.25	1.7		0.49	5.61±0.12	128.27±0.89	1.96	4.37±0.08
4.9±0.02	10.38±0.38	1.6		0.46	4.78±0.08	95.47±0.73	1.624	5.01±0.17
3.5±0.02	7.72±0.25	1.35		0.39	3.00±0.10	34.86±0.42	1.1984	8.61±0.32
1.9±0.01	2.32±0.14	0.55		0.16	0.37±0.02	5.72±0.04	0.1344	6.42±0.30

ККД електродвигуна 88%

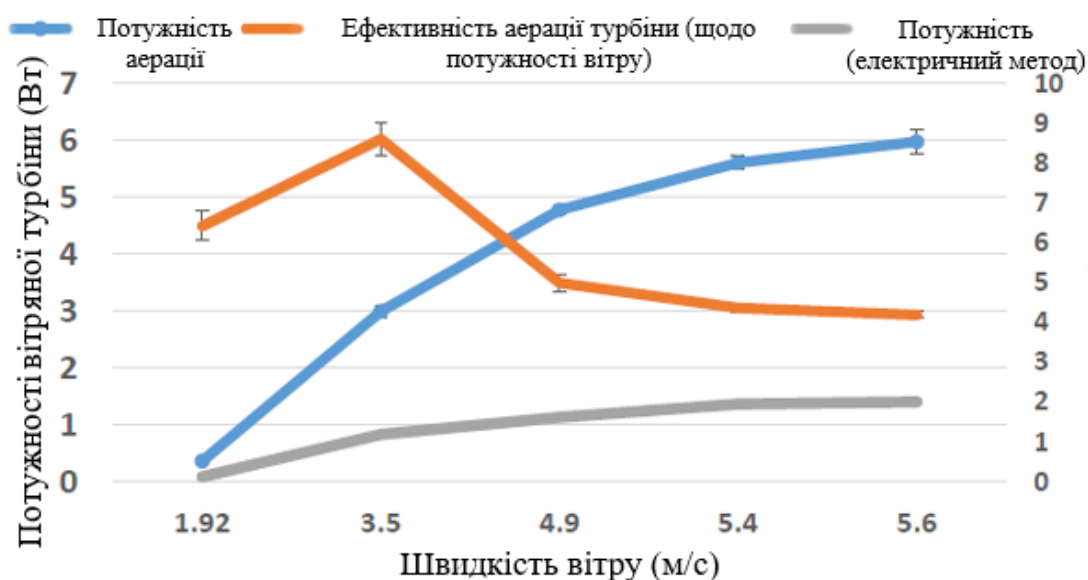


Рис. 3.9. Потужність і ефективність вітрової турбіни при різних швидкості вітру

Частота обертання вітрового ротору була виміряна при різній швидкості вітру, результати експерименту представлені у таблиці 3.4. Відповідно зафіксована частота обертання до 476 об/хв при швидкості вітру 5,4 м/с, що відповідає лінійній швидкості близько 2,77 м/с, що більше ніж у середньому для 12-лопатевої турбіни, для якої рекомендується мати співвідношення швидкостей 2 [21].

Таблиця 3.4

Частота обертання ротора, об/хв

Тунельна апертура (%)	100	90	80	75	70	65	60	55	50	45	40	35	32
Швидкість вітру (м/с)	5.4	5.4	5.4	5.4	5.4	5.4	5.4	5.4	4.9	4.5	3.6	2.7	2.2
Частота обертання валу турбіни	473.0	475.7	475.0	474.0	468.9	456.5	455.0	433.4	418.2	255.3	288.0	208.0	179.0
	475.0	476.0	475.2	473.3	469.4	460.4	446.0	432.5	419.0	255.5	287.5	209.0	179.0
	477.6	475.3	476.0	473.8	467.8	458.9	452.5	432.8	420.0	256.5	287.3	207.6	179.8
Середня	475.0	476.0	475.0	474.0	469.0	459.0	451.0	433.0	419.0	256.0	288.0	208.0	179.0
Частота обертання вентилятора	963.0	955.6	950.0	947.1	945.1	938.2	918.5	889.0	846.0	528.4	573.0	415.0	358.0
	953.7	953.0	953.2	949.5	946.5	935.4	912.0	886.2	851.0	529.6	572.0	419.0	364.0
	957.0	954.9	956.9	950.7	951.0	932.9	916.0	880.2	845.2	528.0	573.4	425.0	359.0
Середня	958.0	955.0	953.0	949.0	948.0	936.0	916.0	885.0	847.0	529.0	573.0	420.0	360.0
Точність вимірювання об/хв	0.99	1.00	1.00	1.00	0.99	0.98	0.99	0.98	0.99	0.97	1.00	0.99	1.00

ВИСНОВОК ДО РОЗДІЛУ 3

За результатами експериментальних досліджень було обрано раціональну конструкцію ротора вітрової турбіни для конвективного сушіння зерна - 12-лопатевий ротор з горизонтальною віссю обертання. Ротор радіусом 0,35 м був виготовлений з деревини бальсу і випробуваний в аеродинамічній трубі (1,2 x 1,2 м).

Пік ефективності системи (8,6 %) спостерігався при швидкості вітру 3,5 м/с. Отже, 12-лопатевий ротор з горизонтальною віссю обертання більш пристосований для роботи в середньому діапазоні досліджуваної швидкості вітру (від 2,5 до 5,5 м/с).

ВИСНОВКИ

Була зроблена спроба продемонструвати потенціал використання економічного і простого пристрою для використання енергії вітру для механічної сушіння зерна пшениці в теплому і вологому кліматі. Був побудований і випробуваний високоміщний ротор вітрової турбіни, здатний видавати попередньо розраховану потужність, необхідну для примусового конвективного сушіння зерна пшениці в умовах низької швидкості вітру (2,0-5,0 м/с). Система вітрової турбіни була випробувана в дозвуковій аеродинамічній трубі в умовах низьких швидкостей вітру, які імітують швидкість вітру на півночі України.

Таким чином, це дослідження є розглядом стійкого стану сушіння зерна пшениці в типових умовах теплому і вологому клімату з низькою швидкістю вітру. Хоча умови випробувань в сталому режимі не гарантують реальної життєздатності розробленої установки в реальному житті, вони дають передумови для висновку про високий потенціал такої вітрової турбіни в аналогічних умовах. Дослідження показало, що при використанні вентиляторів турбіна мала найвищий коефіцієнт використання вітру при швидкості вітру близько 3,5 м/с і витрата повітря до 0,52 м³/с була досягнута на швидкості 5,6 м/с.

У подальших експериментальних дослідженнях необхідно порівняти сушіння при температурі навколишнього середовища 33°C, що еквівалентно температурі навколишнього середовища в сезон збору врожаю, підвищеній на 10 °C за допомогою сонячного теплового колектора.

Це дослідження показує, що існує велика потенційна можливість того, що примусова конвекція від турбіни для низької швидкості вітру може задовольнити потребу в прискореному видаленні вологи під час сушіння в теплому і вологому кліматі.

Для підтвердження ефективності конструктивного рішення, запропонованого в даному дослідженні, необхідні польові випробування в реальних умовах.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Малин Н.И. Справочник по сушке зерна / Н.И. Малин – М.: КолоСС, 2004. – 240 с.
2. Малин Н.И. Снижение энергозатрат на сушку зерна / Н.И. Малин – М.: ЦНИИТЭИ хлебопродуктов, (Обзорная информация. Сер. Элев. пром – сть). – 1991. – 46 с.
3. Резчиков В.А. Теория и практика энергосбережения при сушке зерна / В.А. Резчиков – М.: ЦНИИТЭИ хлебопродуктов, (Обзорная информация. Сер. Элев. пром-сть). – 1991. – 56 с.
4. Станкевич Г. М. Модульних зерносушарок у нас ще немає, а шахтні і рециркуляційні досить енергоємні / Г. М. Станкевич // Зерно і хліб – 2006. – № 4. – С. 47.
5. Котов Б.І. Застосування імпульсно-періодичних режимів вентилявання при реалізації енергоощадної двостадійної технології сушіння зерна / Б.І. Котов, Р.А. Калінченко // Електрифікація та автоматизація сільського господарства. –2003. – № 2. – С. 69 – 74.
6. Сорочинський В. Зневоднення зерна за різних схем утилізації сушильного агента й охолоджуючого повітря може бути доволі ефективно // Зерно і хліб – 2011, №3 – С. 40 – 41.
7. Аніскін В.А. Підвищення якості насіння способами післязбиральної і передпосівної обробки / В.І. Аніскін: Сб.науч.тр. // ВІМ. –1 987. – Т.112. – С. 3 - 20.
8. Манасян С.К. Моделювання і інтенсифікація процесу сушіння зерна // Механізація збирання, післязбиральної обробки і зберігання зерна: мат-ли 2-й Міжнар. наук.-практ. конференції «Хліборобська механіка в рослинництві» (м.Москва, ГНУ ВІМ, 17-18. 12. 2003р.) / Наук. тр. ВІМ. – Т.148. – М., 2003. – С. 216-225.
9. Ткачук В.І. Моніторинг контамінації зернових кормів мікотоксинами на Житомирщині / В.І. Ткачук // Збірник наукових праць —

Проблеми зооінженерної та ветеринарної медицини. – Харків, 2010. – Вип. 1(21). – С. 276 – 282.

10. Evaluation of certain mycotoxins (Fifty-sixth report of the Joint FAO/WHO Expert Committee on Food Additives). WHO Technical Report Series, No. 906, 2002.

11. Evaluation of certain contaminants in food (Eighty-third report of the Joint FAO/WHO Expert Committee on Food Additives). WHO Technical Report Series, No.1002, 2017.

12. Головчак Н. Структура та вплив мікотоксинів на живі організми [Текст] Н. Головчак // Вісник Львів. ун-ту. — 2007. — Вип. 43. — С. 33–47.

13. Пунков С.П., Стародубцева О.І. - Зберігання зерна, елеваторно-складське господарство і зерносушіння - Агропромиздат, 1990. – 331 с.

14. Васянович О.М. Моніторингові дослідження мікобіоти кормів з різних регіонів України / О.М. Васянович, О.Ф. Корзуненко, А.Ф. Ображей та ін. // Ветеринарна біотехнологія. – 2003. – Вип. 4. – С. 27–30.

15. Манасян, С.К. Принципи конвективного сушіння зерна / С.К. Манасян // Укр. КрасГАУ. – 2008. – № 6. – С. 145-150.

16. Манасян, С.К. Камерна зерносушарка / С.К. Манасян // Укр. КрасГАУ. – 2009. – №2. – С. 162-166.

17. А.с. 1483218 СРСР, МКІЗ F 26 В 25/22. Спосіб сушіння зерна та пристрій для його здійснення / Л.В. Колесов, Н.М. Андріанов, С.К. Манасян, С.Г. Гусев, Ю.І. Заборо, В.В. Іванов, Е.Ф. Гришин. - Опубл. 30.05.1989, Бюл. № 20.

18. Пазюк О. Д. Оптимізація процесу сушіння зерна. Задачі та шляхи вирішення / О. Д. Пазюк, І. П. Паламарчук, В. М. Пазюк // Збірник наукових праць Вінницького національного аграрного університету. Серія : Технічні науки. – 2011. – Вип. 9. – С. 164–172.

19. Волков А.И., Жарский И.М. Большой химический справочник - Мн.: Современная школа, 2005. - 608 с.

20. Ткаченко С. Й., Співак О. Ю. Сушильні процеси та установки. Навчальний посібник. - Вінниця: ВНТУ, 2007. - 76 с.

21. Основи вітроенергетики: підручник / Г. Півняк, Ф. Шкрабець, Нойбергер, Д. Ципленков ; М-во освіти і науки України, Нац. гірн. ун-т. – Д.: НГУ, 2015. – 335 с.