

УДК 621.548

Д.О. ДМИТРИЄВ, С.А. РУСАНОВ, О.С. КОСТЕРНИЙ, О.Н. ВОЙЦЕХОВСЬКИЙ

Херсонський національний технічний університет

### КОНСТРУКТИВНО – МЕТРОЛОГІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЯКОСТІ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОГО ПРИВОДУ ЕНЕРГОУСТАНОВКИ “КАСКАД – 3”

*Проведено оцінку електромеханічних характеристик енергоустановки каркасного типу "КАСКАД-3". На основі теоретичних розрахунків крутного моменту на осях турбін, в залежності від швидкості та тиску набігаючого повітряного потоку, визначено взаємозв'язок між параметрами повітря, механічної передачі (мультиплікатора) та електрогенератора, досліджено параметри потужності та необхідні значення крутних моментів електрогенератора, які закладено для проектування мультиплікатора енергоустановки "Каскад 3".*

*Ключові слова:* енергоустановка, "КАСКАД - 3", потужність, крутний момент, електрогенератор.

D.O. DMYTRIEV, S.A. RUSANOV, A.S. KOSTERNY, A.N. WOJTSEKHOVSKI

Kherson National Technical University

### CONSTRUCTIVE AND METROLOGICAL QUALITY ASSURANCE AND EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF ELECTRO - DRIVEN POWER PLANTS "CASCADE - 3"

#### Abstract

*The estimation of Electromechanical characteristics of the power plant frame type "CASCADE-3", on the basis of theoretical calculations of the torque axis turbines depending on the speed and pressure of the oncoming air flow correlations between parameters of air, mechanical transmission (multiplier) and the generator, the investigated parameters of capacity and the required value of torque of the electric generator, which are incorporated for the design of multiplier plant " CASCADE – 3".*

*Keywords:* energy machine, "CASCADE - 3", power, torque, electrical machine.

#### Постановка проблеми

Сучасна ринкова економіка висуває принципово нові вимоги до якості продукції. Виживання будь-якого підприємства, його стійке становище на ринку товарів і послуг визначають рівнем конкурентоспроможності, яка характеризується двома показниками – рівнем ціни та рівнем якості продукції, причому якість продукції стає чи не найголовнішим чинником у поведінці споживача, коли він вибирає товар. Кожен товар повинен бути носієм різних конкретних властивостей, що відображають його корисність і відповідають певним вимогам людини. Корисність товару характеризується споживчою вартістю, а споживча вартість має визначатись відповідною якістю.

У сучасних умовах виробники будь-якої технічної продукції чітко усвідомлюють, що без розширення номенклатури виробів, модернізації існуючих продуктів або створення нових конкурентоздатних зразків, існування їх підприємств стає неможливим. Тому, маючи початкову промислову діяльність із відносно простими виробничими задачами, прагнуть знайти нові конструкції і властивості виробів, що можуть конкурувати на ринку продуктів і послуг в майбутньому. Як правило, малі підприємства не мають власних розвинених конструкторських відділів, здатних на теоретичному і експериментальному рівні забезпечити якість нових виробів, але мають прагнення це зробити. Нерідко такі спроби, засновані на досвіді виробника та інтуїтивному пошуці, закінчуються невдачею.

У практиці застосовуються різні методи підтвердження відповідності того чи іншого виду продукту необхідним вимогам. Це можуть здійснювати виробники, замовники, продавці або незалежні органи й організації. Тому існує проблема всебічного системного забезпечення нових бізнес-проектів на шляху "ідея – спосіб – конструкція – параметри – якість". У таких випадках кадровий, науковий і матеріально-технічний потенціал технічних університетів може бути ефективно використаний для реалізації даних проектів. У підвищенні якості продукції особливо важливу роль відіграють її стандартизація і сертифікація. У нашій країні правові та організаційні засади стандартизації, спрямовані на забезпечення єдиної технічної політики у цій сфері, регулюються Законом України «Про стандартизацію».

У рамках даного твердження було проведено дослідження відповідності якості малої вітроенергетичної установки "Каскад-3", принцип і компоновку якої замовник запропонував Херсонському національному технічному університету (тема ГР № 2/2014, договір від 16.06.14 р.).

### Аналіз останніх досліджень і публікацій

В ХНТУ на кафедрі основ конструювання згідно з договором ГР№02/14 від 16.06.14 проведено попередні теоретичні дослідження очікуваної потужності ВЕУ "КАСКАД-3" за наданими замовником (Ремізовим П.П.) компоновкою і розмірами. Проведено математичне і комп'ютерне моделювання методом кінцевих елементів полів повітряних потоків у конфузори установки. ВЕУ "КАСКАД-3" представлено як математичну систему тривимірною твердотільною моделлю. На вхід моделі введено: геометрія ВЕУ «КАСКАД-3», швидкість набігаючого повітря на фронтальній площині конфузора, тиск назовні, умови обертання турбіни як функція орієнтації лопатки від кута повороту турбіни. На виході математичної моделі отримано: поле розподілення швидкостей повітря в конфузори, поле різниці тиску, крутний момент на осі турбіни, потужність на осі валу турбіни.

Основні результати попередніх досліджень (рис.1):

1. Проведений розрахунок швидкості повітряного потоку без лопаток турбіни підтвердив концепцію замовника щодо підвищення значення швидкості у просвіті між барабаном і стінкою конфузору до максимального у 3,9 разів при швидкості набігаючого потоку 12 м/с і до максимального значення у 2,5 разів при швидкості набігаючого потоку 6 м/с.

2. Середні значення коефіцієнту підвищення швидкості у просвіті лопатки турбіни за рахунок використання конфузору складає 1,8 – 3,2 рази в залежності від швидкості набігаючого потоку.

3. Збільшення фронтальної площі конфузору (раструба) не впливає на коефіцієнт підвищення швидкості.

4. Встановлено значний вплив наявності лопатки і миттєвого кута повороту турбіни як перепони складної форми на розподілення полів швидкості і тиску в зоні конфузору. Тобто, структура турбіни змінює швидкість у просвіті по п.1 і п.2.

5. Розрахунок крутних моментів і очікуваної потужності на осях турбін проведено для середньостатистичної швидкості набігаючого потоку в нашому регіоні 5 м/с і встановлено для наданої замовником компоновки ВЕУ «Каскад-3» на рівні від 1,2 кВт. Дані значення можна розцінювати як початкові, що забезпечує установка на мінімальних швидкостях повітря в Херсонській області (розділ 10 звіту).

6. При моделюванні зовнішньої задачі набігання повітряного потоку на фронтальну площину конфузору отримано нелінійні розподілення швидкості як епюр значень на вході повітря в конфузори і зниження швидкості повітря у середньому в 2 рази по середині площини раструба енергоустановки. Це пояснюється наявністю гідравлічного опору в зоні конфузору на рівні 1,5 кПа.

7. Проведені натурні експериментальні вимірювання швидкості повітря чашечними анемометрами моделей МС-13 ГОСТ 6376-74 і АРИ-49 ГОСТ7193-74, що підтвердили зменшення швидкості повітря з 5 м/с у середовищі до 2,5 м/с на вході в конфузори, однак збільшення у просвіті лопатки до 7,5 м/с.

### Формулювання мети дослідження

Метою дослідження є проведення незалежної оцінки характеристик і властивостей енергетичної установки і встановлення технічних умов, визначення відповідності енергоустановки каркасного типу "КАСКАД-3" вимогам стандартів, проведення попередньої сертифікації енергоустановки замовника на її безпечність та екологічність з метою виходу на міжнародний ринок.

### Викладення основного матеріалу дослідження

Відомо, що вимоги до якості встановлюються і фіксуються в нормативних інформативно-технічних документах: державних, галузевих, фірмових стандартах, технічних умовах на продукцію, у технічних завданнях на проектування або модернізацію виробів, у кресленнях, технологічних картах і технологічних регламентах, у картах контролю якості, а стандартизація узаконює впровадження показників та норм якості продукції, технологічних процесів і прийомів, послуг у відповідній сфері виробництва. Кожна організація-виробник продукції чи послуг повинна прагнути до максимального дотримання всіх вимог, передбачених у тих нормативних документах, які вона використовує.

Державні стандарти України містять обов'язкові та рекомендаційні вимоги. До обов'язкових відносяться:

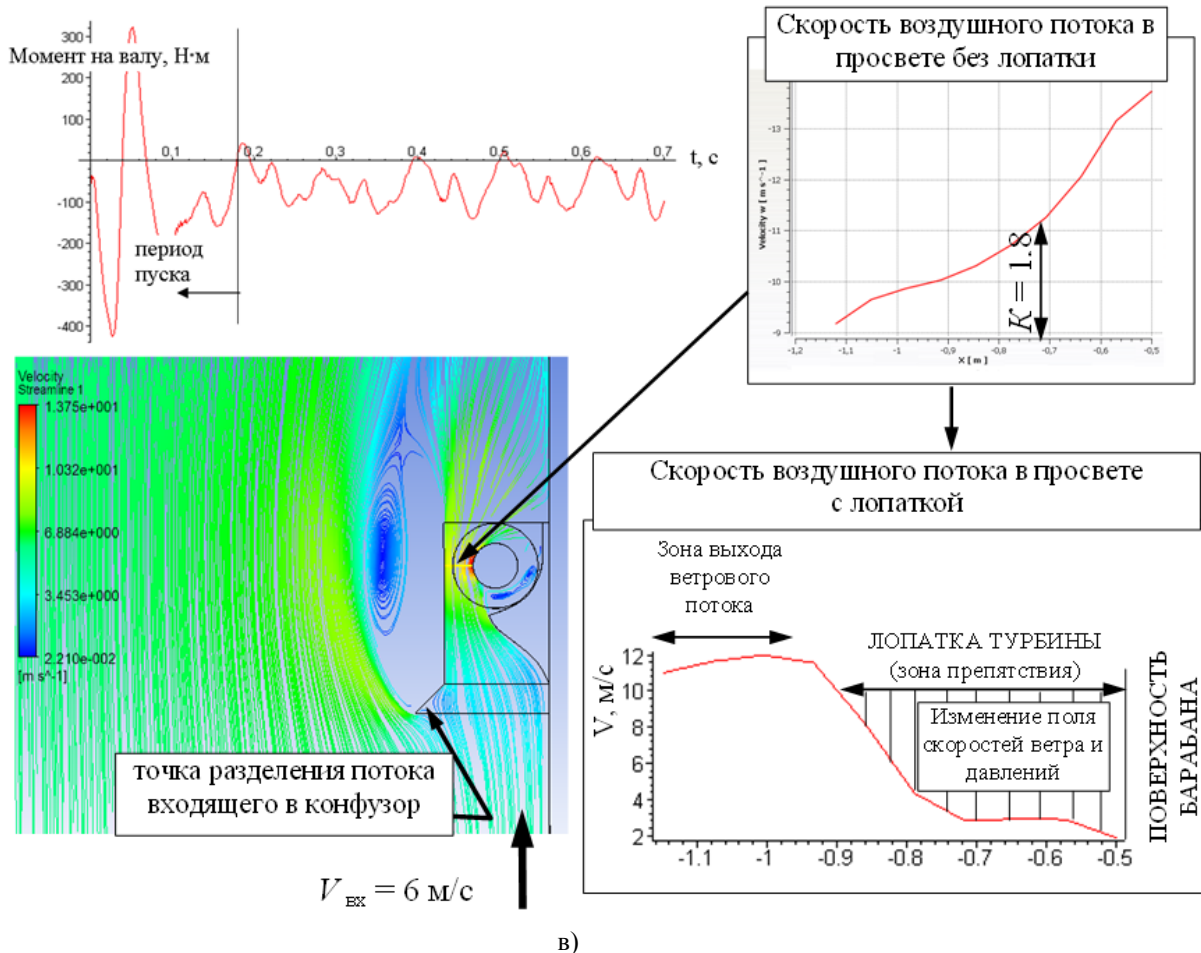
- вимоги, що забезпечують безпеку продукції для життя, здоров'я та майна громадян, її сумісність і взаємозамінність, охорону навколишнього середовища, а також вимоги до методів випробувань цих показників;
- вимоги техніки безпеки та гігієни праці з посиланнями на відповідні санітарні норми і правила;
- метрологічні норми, правила, вимоги та положення, які забезпечують достовірність і точність вимірювань;
- положення, які забезпечують технічну сумісність під час розробки, виготовлення, експлуатації продукції.



а)



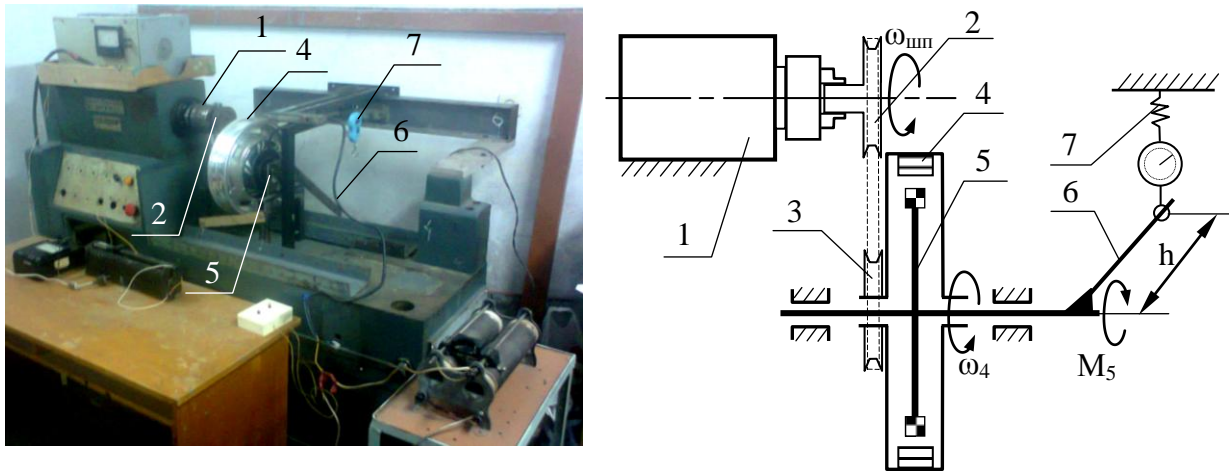
б)



в)

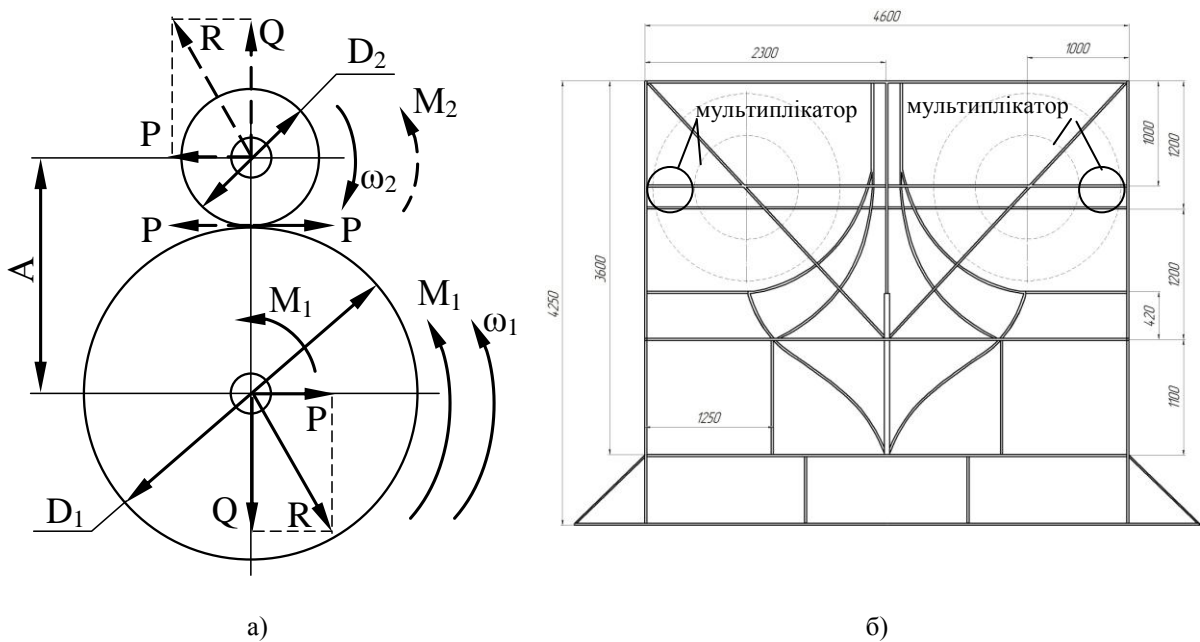
**Рис.1. Загальний вигляд та енергетичні параметри виготовленої енергоустановки "КАСКАД -3"**

У науковій лабораторії кафедри основ конструювання спроектовано та виготовлено стенд для перевірки генератора.



**Рис. 2. Виготовлений дослідний стенд (а) і кінематична схема стенду по принципу мотор-тормози (б) для вимірювання струмо-швидкісних характеристик електрогенератора:**  
 1 - шпиндель, 2 – ведучий шків клино-пасової передачі, 3 – ведений шків, закріплений на корпусі генератора 4 з обмотками, 5 – вісь генератора з високоенергетичними постійними магнітами, 6 – важіль, 7 – динамометр

У даному випадку вибираємо фрикційну передачу тому, що вона має ряд переваг, основними з яких є: плавність та безшумність роботи, простота конструкції та експлуатації, а також низька ціна коліс.



**Рис. 3. Силовa схема фрикційної передачі мультиплікатора (а) та імовірне місце розташування осей і роликів фрикційної передачі на каркасі конфузора енергетичної установки (б)**

**Основні параметри мультиплікатора**

Вихідні дані для проектування :

- матеріал для ведучого та веденого коліс;
- крутний момент ведучого колеса, що визначено теоретично  $M = 120 \text{ Нм}$ ;
- швидкості обертання ведучого та веденого валів  $n_1 = 100 \text{ об/хв}$   $n_2 = 1000 \text{ об/хв}$ ;
- прийняте перевальне відношення  $i=0,1$ .

Необхідна сила притискування коліс визначається за формулою (рис. 3, а):

$$Q = \frac{2 \cdot k_p \cdot M_1}{f \cdot D_1} = \frac{2 \cdot 1.4 \cdot 120}{0.7 \cdot 1} = 480 \text{ Н}, \tag{1}$$

де  $k_p$  – коефіцієнт режиму роботи передачі;  
 $M_1$  – номінальний момент на ведучому колесі;  
 $f$  – коефіцієнт тертя;  
 $D_1$  – діаметр ведучого колеса.  
 Визначаємо сили реакції на опорах валів фрикційної передачі (рис. 3, б):

$$R = \sqrt{Q^2 + P^2} = \frac{2 \cdot k_p \cdot M_1}{f \cdot D_1} \cdot \sqrt{1 + f^2}. \quad (2)$$

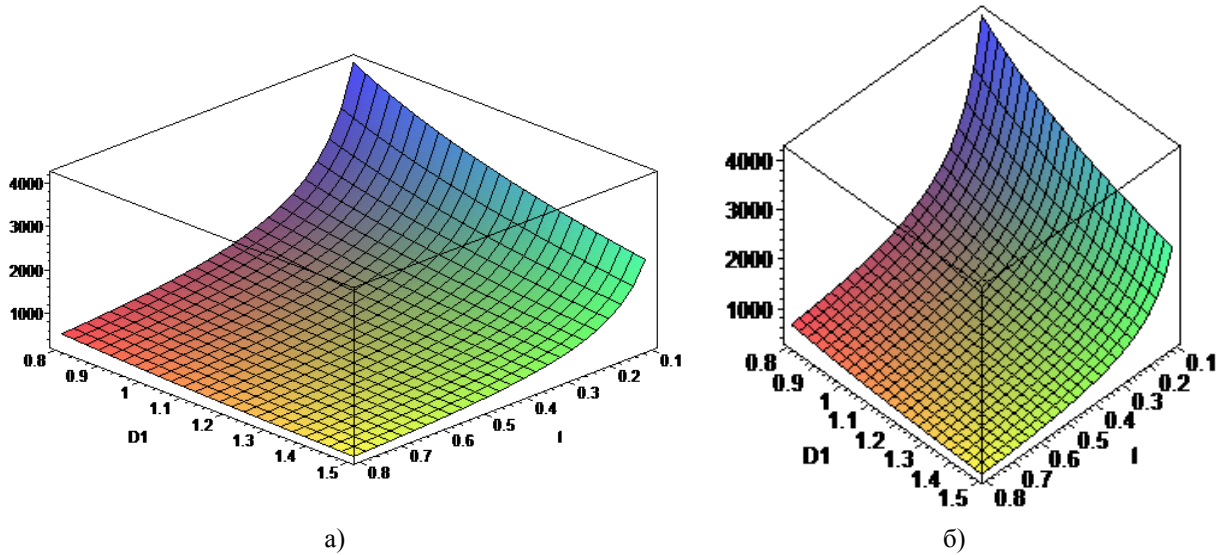


Рис. 4. Область проектних значень сили притискування Q роликів (а) та сили реакції R на валах (б) фрикційної передачі мультиплікатора

Перевірка працездатності фрикційної передачі за критерієм зносостійкості робочих поверхонь коліс визначимо по формулі Герца-Беляєва (рис. 4)

$$\sigma_k = 0,836 \cdot \sqrt{\frac{k_{ia} \cdot \dot{\gamma}_1 \cdot \dot{A}_{i\dot{\gamma}} \cdot i + 1}{f \cdot D_1^2 \cdot B} \cdot \frac{i + 1}{i}} \leq [\sigma_k] \quad (3)$$

де  $k_{nr}$  – коефіцієнт навантаження;  
 $E_{nr}$  – приведений модуль нормальної пружності;  
 $i$  – передавальне відношення.

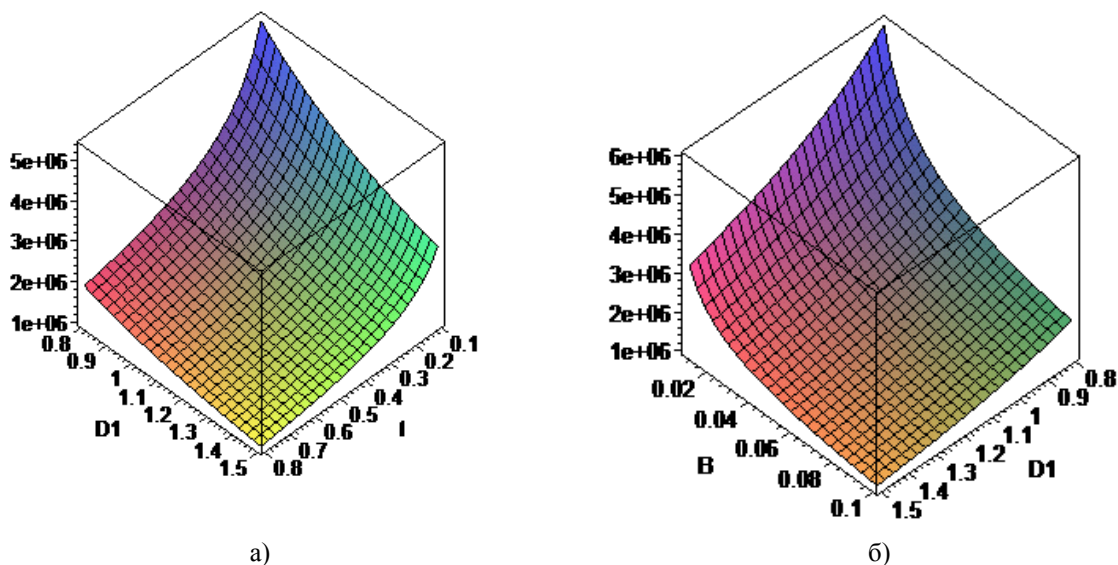


Рис. 5. Контактні напруження на поверхні роликів фрикційної передачі мультиплікатора енергоустановки в залежності від діаметра  $D_1$  та коефіцієнта тертя  $f$  при  $B=0.05$  (а) та ширини роликів  $B$  при  $f=0.4$  (б)

**Основні параметри жорсткості та міцності поворотно-опорних частин конфузору енергоустановки**

Розрахунок осевого моменту інерції та геометричних параметрів валу поворотної осі конфузору (рис. 5):

$$J = \frac{F_{nom} \cdot l^3}{3 \cdot E \cdot y}, \tag{4}$$

де  $F_{nom}$  – сила набігаючого потоку;  
 $l$  – висота конфузору (плече еквівалентного згинаючого моменту);  
 $y$  – прогин центральної осі конфузору.  
 З визначеного осевого моменту інерції розрахуємо значення діаметру циліндричного валу поворотної осі:

$$d_{in} = \sqrt[4]{\frac{32 \cdot J}{\pi}} = 0.15 \dot{l}. \tag{5}$$

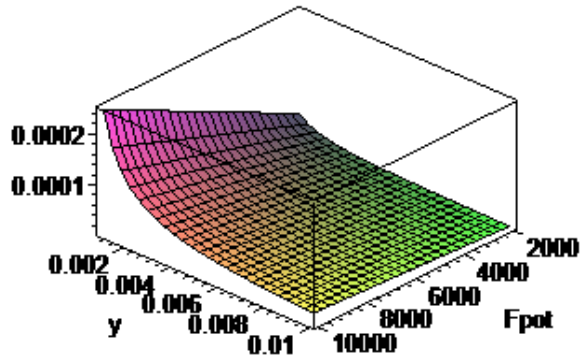


Рис. 6. Область визначення осевого моменту інерції  $J$  в залежності від сили повітря набігаючого потоку  $F_{nom}$  (м/с) та граничного прогину  $y$  (м) еквівалентного плеча  $l$

**Розрахунок геометричних параметрів опорних роликів поворотної частини конфузору по критерію контактної міцності**

Імовірні значення контактних напружень на роликах поворотної опори визначаємо за формулою Герца-Беляєва для контакту циліндра з площиною (рис. 6):

$$\sigma_H = 0,418 \cdot \sqrt{\frac{R_{on}}{b} \cdot \frac{E}{b \cdot R_k}}, \tag{6}$$

де  $R_{on}$  – величина сили реакції на ролик поворотної опори, Н;  
 $b$  – ширина ролику поворотної опори, м;  
 $R_k$  – радіус ролику поворотної опори, м.

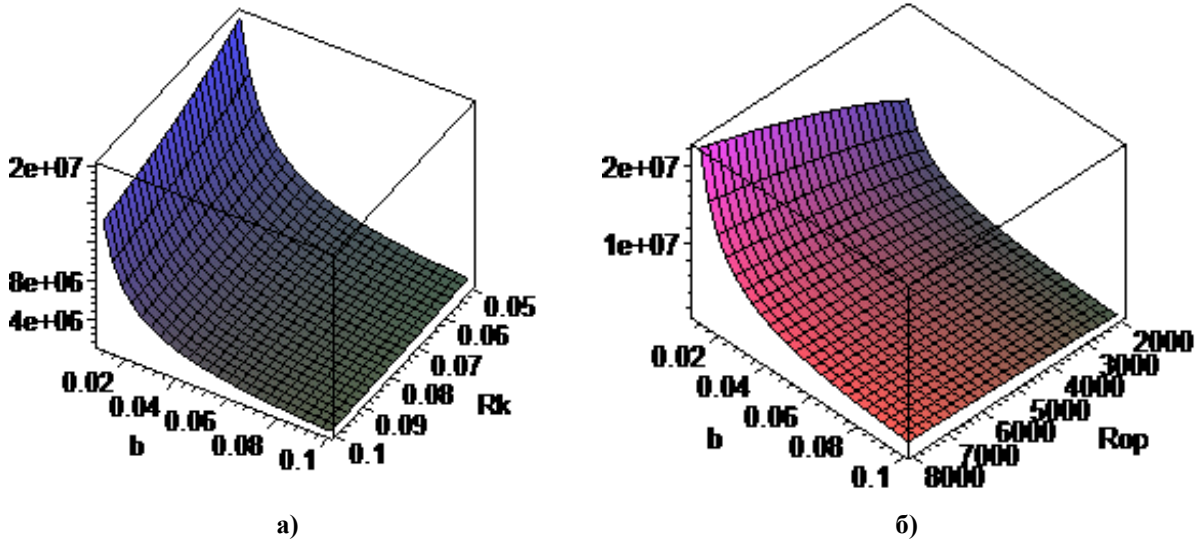


Рис. 7. Контактні напруження ( $\delta_H$ , Па) поверхонь ролика і опорної площини при  $R_{op}=5406$  Н в залежності від ширини і радіусу ролика (а) та (б) в залежності від сили реакції  $R_{op}$  та ширини ролика  $b$  при радіусі ролика  $R_k=0.06$  м

**Висновки**

За результатами дослідження зроблено наступні висновки:

- на основі теоретичних розрахунків крутного моменту на осях турбін енергетичної установки "Каскад 3" в залежності від швидкості та тиску набігаючого повітряного потоку визначено взаємозв'язок між параметрами повітря, механічної передачі (мультиплікатора) та електрогенератора;

- виготовлено дослідний стенд для випробувань струмо-швидкісних характеристик електрогенератора за схемою мотор-терези, що планується для використання в енергоустановці;
- досліджено параметри потужності та необхідні значення крутних моментів електрогенератора, які закладено для проектування мультиплікатора енергоустановки "Каскад 3";
- визначено область проектних значень сил притискання роликів фрикційної передачі у залежності від діаметрів та матеріалів;
- визначено область проектних значень сил реакцій на опорах валів фрикційної передачі;
- перевірено працездатність мультиплікатора за критерієм Герца-Беляєва;
- визначено імовірні жорсткість та переріз поворотної осі конфузора за критерієм міцності;
- визначено діапазон сил, що діють на опорні ролики поворотної частини конфузору та геометричні характеристики роликів кочення.

#### Напрямки подальших досліджень

В подальшому планується визначення оптимальних числових значень конструктивних параметрів енергетичної уставки "Каскад 3" за отриманими областями рішень.

#### Список використаної літератури

1. Янсон Р.А. Ветроустановки: Учеб. пособие / Под редакцией М.И. Осипова. – М.: Изд-во МГТУ им. Баумана, 2007. – 36 с.
2. Рензо Д, Зубарев В.В. Ветроэнергетика. – Москва.: Энергоатомиздат, 1982. – 271 с.
3. Приходько А.А., Редчиц Д.А. Компьютерное моделирование аэродинамики подвижных роторов ветроагрегатов Дарье и Савониуса // Аэрогидродинамика: проблемы и перспективы. – 2006. – Т. 2. – С. 120-142.
4. Пат. № 91379 Україна, МПК F03B 13/10. Енергетичний пристрій «КАСКАД-3»/ Ремізов П.П. – № а2013 11898; Заявлено 09.10.2013; Надрук. 10.07.2014; Бюл. №13/
5. Ремізов П.П. Моделирование работы турбины гидродинамического устройства "Каскад-М" / П.П. Ремізов, С.А. Русанов, Д.А. Дмитриев // Вост.-Европ. журн. передовых технологий. – 2012. – № 2/8. – С. 64-67.
6. Фатеев Е.М. Ветродвижатели и ветроустановки. – Москва, 1948.
7. Дмитрієв Д.О. Прогнозована потужність вітроенергетичної установки «КАСКАД – 3» / Д.О. Дмитрієв, П.П. Ремізов, С.А. Русанов, О.О. Лобов // Перспективні технології та прилади. – 2014 – №5(2) – С. 41-46