

МЕХАНІЗАЦІЯ

УДК. 620.9 : 577.4

Можаровський М.М.
старший викладач

ДО ПИТАННЯ АКУМУЛЮВАННЯ ТА ЗБЕРІГАННЯ ЕНЕРГІЇ ЯК ОДНОГО З ВАРІАНТІВ ПОКРАЩЕННЯ ЕКОЛОГІЧНОГО СТАНУ НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА

Розглядаються питання акумулювання та збереження енергії як способів підвищення К.К.Д. енергетичних установок і економії енергії. Показана перспективність механічних (маховичних) акумуляторів енергії. Приводиться оптимізація форми і розмірів маховика. На основі експериментальних досліджень показується перспективність використання нових конструкційних матеріалів (волокнистих композитів) в конструкціях роторів маховиків.

Удосконалення енергетичних технічних засобів на певному етапі розвитку суспільства є актуальним питанням, яке порушує всі галузі народного господарства. Основним завданням цього питання має стати економія енергетичних ресурсів, що в свою чергу пов'язане з покращенням екологічного стану навколишнього середовища.

Враховуючи той факт, що в цей період промисловість і весь народно-господарський комплекс використовує

величезну кількість енергії і майже повністю залежить від нафти, то питання економії нафти та ефективності її використання являється актуальними, а що до транспорту, то воно є основним.

Одним з шляхів економії нафти пов'язують використання електроенергії на транспорті та в інших галузях народного господарства. Можливості використання електроенергії на транспорті досліджуються в різних країнах (рис. 1) [3].

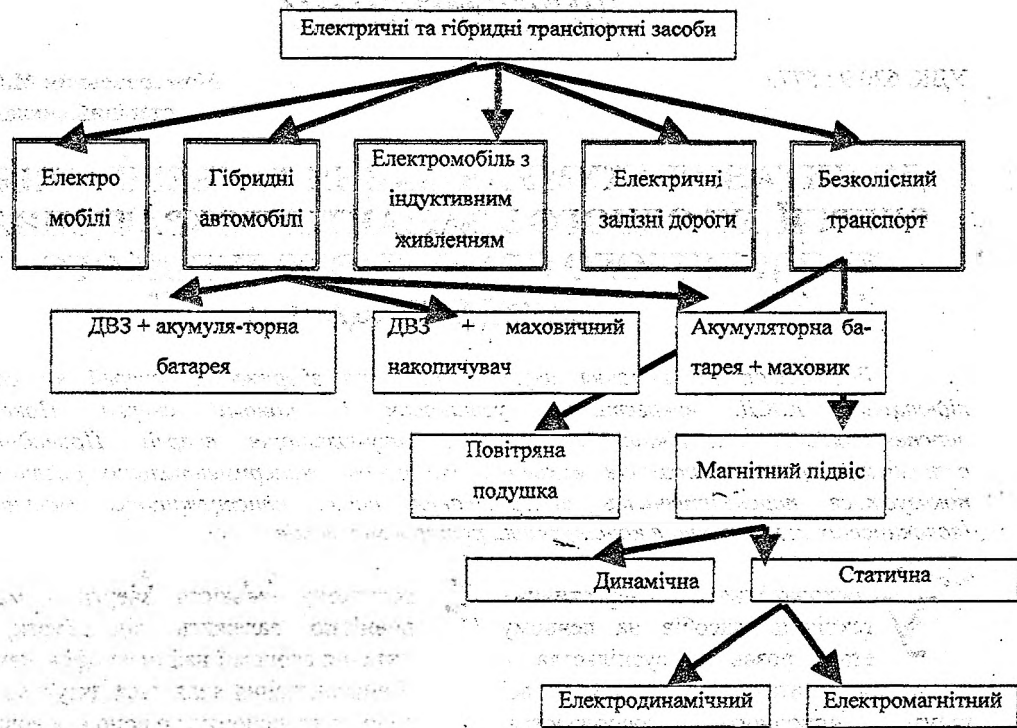


Рис.1. Схема використання електроенергії на транспорті.

Таблиця 1

Параметри накопичувачів енергії різних типів.

Тип	Автомобільні системи		Діапазон енергії (кВт·год)	Діапазон розрядки	Ступінь розробки	Можливе використання
	Діапазон	Діапазон				
Батареї:						
Свинцево-кислотні	60-75	60-100	25-50	30-60	Практичне використання	Пікові, аварійні і резервні енергомисткості
Водяні (перспектива)	60-75	60-100	15-50	30-90	Малі прототипи	і бортові джерела, накопичувачі для систем сонячної енергії.
Високотемпературні	70-80	60-100	15-35	60-150	Лабораторні елементи	
Окисно-відновні	60-70	100-200	50-100	15-60	Теоретичні і лаб. Дослідження	
Механічні: Маховичні	70-85	80-120	50-100	15-60	Початок промислового використання	Пікові, аварійні, резервні джерела енергії, накопичувачі для систем сонячної енергії.
АЕС	67-75	100-140	2-15	1,2		
Електромагнітні: Надпровідні магніти	80-90	40-50	35-200	15-30	Практичне використання	Проєкти. Розробка елементів
						Центральні пікові накопичувачі енергосистем.
						Те саме.

Як видно із схеми, представленої на рис.1, одним із способів економії розглядається створення гібридних автомобілів в ряді конструкцій яких, з метою економії нафти, передбачається використання

двигуна внутрішнього згорання в поєднанні з акумуляторами енергії.

Із табл.1 видно, що акумуляторні батареї, які знаходять широке практичне використання, забезпечують питому енергію до 60 кВт*год./м³ при к.к.д. близько 75%.

Але використання їх при енергіях накопичення 10^{11} Дж і більше перешкоджає висока вартість при терміні служби 2-3 роки або 300-500 циклів [2], а також необхідність витрати дефіцитних кольорових металів. Водяні та інші типи батарей знаходяться в стадії теоретичних і лабораторних досліджень.

Максимальний к.к.д. електромеханічних накопичувачів може досягати 85%, наближаючись до К.К.Д. надпровідних (НП) накопичувачів. Вони за питомою енергією не поступаються акумуляторним батареям (до $60 \text{ кВт}\cdot\text{год}/\text{м}^3$) і вдвічі переважають НП накопичувачі (до $30 \text{ кВт}\cdot\text{год}/\text{м}^3$). Слід також відмітити властивості електромеханічних накопичувачів видавати енергію в вигляді потужного короткочасового імпульса електричної енергії та довговічність. Згідно [2], при віддачі 75% енергії вони витримують більше 10^5 циклів. Найбільш важливими показниками накопичувачів слід вважати питому енергомісткість та коефіцієнт корисної дії агрегату в цілому.

У роботі [4] показується, що деякі розрахунки, що фігурують в технічній літературі, показують, що приблизно 65% енергії, спожитої міськими транспортними засобами, витрачається на їх прискорення, а потім ця енергія майже повністю розсіюється при гальмуванні. Ці розрахунки ще раз підкреслюють, наскільки актуальним є питання регенерації енергії, що вивільнюється при гальмуванні транспортних засобів. Додатковим позитивним ефектом в рекуперативному гальмуванні може бути зменшення кількості шкідливого для здоров'я азбестового пилу, що утворюється

при зношенні гальмівних накладок. Необхідно відмітити, що маховичні накопичувачі наділені багатьма цікавими і корисними властивостями. До них можна віднести такі:

- здатність автоматично переходити з режиму акумуляування на режим двигуна;
- здатність створювати гіроскопічний ефект, властивий маховику;
- здатність здійснювати роботу, не створюючи реактивного моменту, що вносить вплив на опори і т. д..

У ряді публікацій приводяться приклади накопичувачів з маховиками і параметри таких установок. Так, в статті Р. Поста і С. Поста [9] показано, що маховик діаметром від 3,6 до 4,6 м і вагою 100-200 т із склопластика при частоті обертання 3500 об/хв здатний запасати 10-20 $\text{МВт}\cdot\text{год}$ електроенергії. Вартість побудови агрегату на 10 $\text{МВт}\cdot\text{год}$ дорівнює 325 тис. доларів (в цінах 1983 року) і є нижчою, ніж вартість побудови ГАЕС (гідроакумуляторної електростанції) номінальної потужності 3000 кВт з к.к.д. 93-95% при вартості 110 дол/кВт \cdot год. Відповідно займана площа складе 0.45-0.23% від площі ГАЕС рівної потужності.

Співсталення електромеханічних накопичувачів з ГАЕС, газотурбінними установками, НП накопичувачами і хімічними джерелами енергії дозволяють вважати, що ближчим часом вони будуть успішно використовуватись як в стаціонарних, так і в пересувних

установках в широкому діапазоні потужностей.

Ефективність використання акумулятора кінетичної енергії (маховика) буде залежати від максимальної енергоємності ротора маховика. У свою чергу максимальну енергоємність ротора можна

отримати при його оптимальній формі.

Якщо розглядати рівняння рівноваги диска змінної товщини $h(r)$, що обертається, то можна записати

$$\frac{d}{dr}(hr\sigma_r) - h\sigma_\theta + \rho_v \omega^2 r^2 h = 0 \quad (1)$$

Проінтегруємо рівняння (1) і отримаємо:

$$\int_0^b \int_a^r \left[\frac{d}{dr}(hr\sigma_r) - h\sigma_r + \rho_v \omega^2 r^2 h \right] r dr d\theta \quad (2)$$

де a і b - внутрішній і зовнішній радіуси диска. Використання рівняння вигляду

$$\frac{d}{dr}(r^2 h \sigma_r) = r h \sigma_r + r \frac{d}{dr}(r h \sigma_r) \quad (3)$$

дозволяє отримати замість (2) такий вираз:

$$\int_a^b \left[\frac{d}{dr}(r^2 h \sigma_r) - h_r(\sigma_r + \sigma_\theta) + \rho_v \omega^2 r^2 h \right] dr \quad (4)$$

Кінетичну енергію диска, що обертається, як відомо можна знайти за такою формулою:

$$W = \pi \int_a^b \rho_v \omega^2 r^3 h(r) dr \quad (5)$$

Підстановкою виразу (5) в (4) отримаємо такий вираз:

$$W = \pi \int_a^b \left[hr(\sigma_r + \sigma_\theta) - \frac{d}{dr}(r^2 h \sigma_r) \right] dr \quad (6)$$

Якщо врахувати, що напруги у диску, що вільно обертається $(\sigma_r)|_{r=a} = (\sigma_r)|_{r=b} = 0$, або для суцільного диска (при $a = 0$; $\sigma_r|_{r=b} = 0$) вираз (12) набуде такого вигляду:

$$W = \pi \int_a^b h(r) r (\sigma_r + \sigma_\theta) dr \quad (7)$$

Зробивши припущення, що максимально допустимі напруження в матеріалі можуть дорівнювати границі міцності при розтягуванні в радіальному та окружному напрямках

(P_r^+ та P_θ^+) (критерій максимальних напружень) і підставляючи в (6) такі вирази :

$$\sigma_r = P_r^+ + (\sigma_r - P_r^+) \quad \sigma_\theta = P_\theta^+ + (\sigma_\theta - P_\theta^+)$$

отримаємо такий вираз для кінетичної енергії диска, що обертається:

$$W = \frac{1}{2\rho_v} (P_\theta^+ + P_r^+) M - I \quad (8)$$

де

$$M = 2\pi\rho_v \int_a^b h(r)r dr$$

маса диска.

$$I = \pi \int_a^b (P_r^+ - \sigma_r + P_\theta^+ - \sigma_\theta) h(r)r dr$$

Поскілки нами був прийнятий критерій максимальних напружень,

$$\sigma_r \leq P_r^+ \quad \sigma_\theta \leq P_\theta^+ \quad (9)$$

то з виразу (7) витікає, що $I \geq 0$.

Проаналізувавши (7) можна упевнитись, що при використанні ізотропних матеріалів в якості конструкційних для роторів АКЕ, максимальну питому масову енергемісткість будуть мати ротори з формою дисків рівного опору, тобто дисків з одноріднонапруженим

станом, коли $\sigma_r = \sigma_\theta = \sigma_P$, де σ_P — допустимі в матеріалі напруження. З проведеного аналізу можна отримати формулу для

розрахунку питомої масової енергемісткості ротора маховика, яка буде мати такий вигляд

$$W^M = \frac{\sigma_P}{\rho_v} \quad (10)$$

Профіль диска рівного опору змінюється, як відомо з літератури [4] за таким законом

$$h(r) = h_0 e^{-\frac{\rho_v \omega^2 r^2}{2\sigma_P}} \quad (11)$$

Питома об'ємна енергомiсткiсть такого диска буде близькою до нуля внаслідок необмежено великого об'єму, що обмежується його габаритами ($h \rightarrow 0$, при $r \rightarrow \infty$). У дисковi кiнцевих розмiрiв, якщо виконується умова $\sigma_r = \sigma_p$ на зовнiшньому радiусi,

$$W^M = \left[1 - \frac{\rho_v \omega^2 b^2}{2\sigma_p} \times \frac{e^{-\frac{\rho_v \omega^2 b^2}{2\sigma_p}}}{1 - e^{-\frac{\rho_v \omega^2 b^2}{2\sigma_p}}} \right] \quad (12)$$

Питому об'ємну енергомiсткiсть для такого ротора можна вирахувати за наступною формулою

$$W^V = \frac{2\sigma_p^2}{\rho_v \omega^2 b^2} \left[1 - e^{-\frac{\rho_v \omega^2 b^2}{2\sigma_p}} \left(1 + \frac{\rho_v \omega^2 b^2}{2\sigma_p} \right) \right]$$

З аналізу формули (11) витiкає, що максимальна питома об'ємна енергомiсткiсть ротора маховика в формi диска рiвної мiцностi може досягатись в дисковi, розмiри якого визначаються наступним

$$W^V \approx 0,3\sigma_p$$

На практицi прийнято часто використовувати ротори маховикiв в формi дискiв рiвного опору, з'єднаних на периферiї з ободом [1], що дозволяє забезпечити постійне радiальне напруження на зовнiшньому радiусi. У проведених вище оцiнках питомої енергомiсткостi вплив розмiрiв i маси

необхiдно враховувати вклад другого члена в формулi (6), що буде рiвним $\pi b^2 h_b \sigma_p$, де h_b - осьова товщина диска на периферiї. У цьому випадку питома масова енергомiсткiсть може бути визначена за такою формулою:

$$\text{спiввiдношенням: } \frac{h_0}{h_b} \cong 6,0 \text{ в в в в}$$

В цьому випадку формули для визначення об'ємної та масової енергомiсткостi набувають такогуючого вигляду:

$$W^M = 0,64 \frac{\sigma_p}{\rho_v}$$

ободу не враховувався. У роботi [1] вiдмiчалось, що за рахунок з'єднання диска з ободом вдається пiдвижити питому масову енергомiсткiсть до

$$\text{величини приблизно } 0,9 \frac{\sigma_p}{\rho_v}$$

Таким чином для роторiв з iзотропних матерiалiв досить чiтко

можна визначити допустимі значення масової енергоемності та оптимальної форми ротора. Відхилення від цієї форми приводить до зменшення щільності енергії в роторі акумулятора кінетичної енергії.

$$\sigma_{\theta} = \text{const}; \quad \sigma_r = \text{const}; \quad \sigma_{\theta} = \sigma_r.$$

З результатів такого аналізу випливає, що максимальна масова енергоемність при використанні анізотропних матеріалів (наприклад волокнистих композитів) може бути

$$W_{\max}^M = 0,5 \frac{P_{\theta}^+}{\rho_v} \quad (14)$$

де P_{θ}^+ — гранично допустима міцність при розтягуванні композитних матеріалів вздовж волокон;

ρ_v — питома вага композитів.

При цьому об'ємна питома енергоемність зовсім виявляється низькою. При переході до більш товстих кілець аналіз ускладнюється і стає громіздким.

З проведеного аналізу випливає, що питома масова енергоемність роторів АКЕ є основною їх характеристикою. Вона знаходиться в прямій залежності від граничної міцності конструкційного матеріалу при розтягуванні та в оберненій залежності від його питомої ваги. Вказані характеристики матеріалу доцільно використовувати при виборі матеріалу під час проектування ротора з метою оцінки його можливих енергетичних характеристик.

Аналіз, аналогічний проведеному, для анізотропного матеріалу не дає особливо змістовних результатів. Велика різниця механічних властивостей в різних напрямках цих матеріалів не дозволяє спроектувати диск в якому виконувалися б наступні умови :

досягнута в безкінечно тонкому кільці, де можна вважати відсутніми радіальні напруження в матеріалі. Кількісно її можна оцінити за такою формулою:

Але належить відмітити, що залежність (14) визначає енергоемність тонких кілець з анізотропного матеріалу, використання яких з точки зору об'ємної енергоемності в реальних конструкціях роторів маховиків буде неефективним. Тому для збільшення об'ємної характеристики енергоемності в таких конструкціях необхідно створювати попередні напруження шляхом натягу волокон (стрічок) при виготовленні енергоемних ободів. Ці напруження будуть змінювати характер пружно-деформованого стану в полі дії відцентрових сил, зменшуючи значення радіальних навантажень і збільшуючи значення колових.

Поява нових конструкційних матеріалів на основі високоміцних волокон і полімерних в'язучих речовин (волокнистих композитів) відкриває нові можливості в напрямку створення високоефективних АКЕ. Такі матеріали є анізотропними і питома

міцність їх в напрямку волокон в декілька разів може перевищувати міцність високолегованих сталей. Руйнування таких матеріалів є відносно безпечним і не потребує створення захисних пристроїв великої ваги. На шляху переходу до практичного використання волокнистих композитів в конструкціях роторів АКЕ необхідно вирішити ряд проблем. Поскілки матеріали анізотропні, то конструкції роторів повинні створюватись так, щоб максимальні напруження, що створюються в роторі відцентровими силами і крутними моментами діяли вздовж волокон. Орієнтовні шляхи реалізації високої питомої міцності композитів в конструкціях роторів маховиків приводяться в роботі [5] .

Для оцінки ефективності використання волокнистих композитів в конструкціях роторів маховиків можна привести теоретичні характеристики енергомісткості [8], що представлені в табл. 2. Ці характеристики відповідають міцності при короточасових випробуваннях і відповідають безкінечно тонким кільцям, які при обертанні працюють лише на розтягування в коловому напрямі. Вони представляють собою ідеальний випадок використання волокнистих композитів в конструкції роторів.

Але, як вияснилось при [6,7] .

проведенні експериментальних досліджень в лабораторії ЖІТІ, реалізація високих потенційних можливостей – не тільки міцності, але і технологічних наштоткнулися на ряд труднощів, що притаманні композитам як конструкційним матеріалам.

Прагнення до отримання максимальної міцності в коловому напрямі пов'язане з використанням колової намотки . При цьому збільшення колової міцності супроводжується проявленням традиційних недоліків волокнистих композитів – низькою зсуваючою міцністю і міцністю на поперечний відрив, що, в свою чергу, стає причиною розшарування енергомісткого обода ротора як в процесі розгону чи гальмування, так і при обертанні з постійною швидкістю.

При конструюванні роторів маховиків з композитних матеріалів на практиці необхідно підходити зі сторони ефективного використання матеріалу. При цьому необхідний аналіз таких факторів , які вважаються другорядними чи не розглядаються взагалі при використанні ізотропних матеріалів. До них можна віднести, наприклад: малі радіальні розтягуючі напруження і особливості напруженого стану поблизу кінців арматури, з якої намотується виріб

Таблиця 2.

Матеріал	Гранична міцність для розтягування і злов'язу здатності	Питома вага г/см ³	Питома масова енергомісткість Дж/кг
Склопластик (на E-волокнах)	110	2,1	73
Склопластик (на S ₂ -волокнах)	175	2,0	122
Вуглепластик (на волокнах HS –графіт)	180	1,6	160
Органопластик (на волокнах Kevlar – 49)	180	1,35	187

При конструюванні роторів маховиків з композитних матеріалів на практиці підходять зі сторони ефективного використання матеріалу. При цьому необхідний аналіз таких факторів, які вважаються другорядними чи не розглядаються взагалі при використанні ізотропних матеріалів. До них можна віднести, наприклад: малі радіальні розтягуючі напруження і особливості напруженого стану поблизу кінців арматури, з якої намотується виріб [7].

Створення системи початкових напружень при намотці роторів, що пропорційні товщині намотаного шару (виробу) і при певній товщині можуть стати причиною появи тріщин в готовому виробі [6].

У зв'язку з великою перспективністю використання композитних матеріалів ведеться активний пошук конструктивних рішень і технологічних прийомів, що дозволяють створювати оптимальні конструкції роторів маховиків з максимальною питомою енергомісткістю.

Проведені теоретичні і експериментальні дослідження в

цьому напрямку виділяють, в основному, чотири способи підвищення питомої енергомісткості при збереженні достатньо високої масової:

- перехід від тонкостінних до товстостінних кілець і дисків;
- профільовання кілець і дисків;
- проектування гібридних роторів, що складаються з декількох матеріалів, і використанням різних схем армування одного і того ж композитного матеріалу.

Можна вважати, що до даного часу склалися основні уявлення про шляхи ефективного використання композитних матеріалів в конструкціях роторів маховиків. Але практична сторона цього питання ще далека від завершення. Заміна композиту однорідним анізотропним матеріалом в розрахунках міцності не відповідає суті, явищякі проходять, втоми і руйнування в ньому. У той же час не розглядаються такі явища, як механіка мікроруйнування. В результаті, при розрахунках використовується спрощена модель, яка об'єднує реальні властивості матеріалу з певними інженерними

припущеннями. До того ж питання динаміки стосовно роторів маховиків з волокнистих композитів практично не розглядались. Все це робить

актуальними питання експериментального дослідження міцності роторів маховиків з композитних матеріалів.

Таблиця 3

Тип моделі Матеріал	Питома вага 10^3 кг/м ³	Міцність 10^4 МПа	Гранична питома масова енергоміцність, Дж/г		Гранична колова швидкість, м/с
			Розрахунок	Експеримент	
Тонкий обод Kevlar 49 + епокс. зв'язка	1,36	21,5	790	630	1156
Kevlar 29 + епокс. зв'язка	1,36	17,5	650	560	1093
Скло (на E- волокнах + епокс. зв'язка)	2,07	15,0	370	250	733
Скло (на S- волокнах + епокс. зв'язка)	2,03	18,9	470	460	986

Для реальної оцінки теоретичних розрахунків питомої масової енергоміцності волокнистих композитів (табл.2) проводились розгонні випробування достатньо тонких кілець за допомогою спеціального пристосування. Результати цих досліджень представлені в табл.3.

Представлені результати показують, що досягнуті питомі масові енергоміцності близькі до розрахункових граничних значень і суттєво перевищують аналогічні характеристики суцільних дисків рівного опору з ізотропного матеріалу.

Але на практиці конструкція роторів повинна бути такою, в якій максимально використовуються як масова, так і об'ємна енергоміцності. Тому реальні

конструкції будуть відрізнятися від модельних кілець.

У лабораторії ЖІТІ проводились експериментальні дослідження реальних моделей і конструкцій роторів маховиків з волокнистих композитів. Для проведення таких досліджень були сконструйовані та виготовленні спеціальні експериментальні стенди.

Результати проведених експериментальних досліджень міцності роторів з композитних матеріалів є небагаточисельними роботами в цьому напрямку, і являють собою цінну інформацію, яка необхідна при подальшому удосконаленні конструкції і технології виготовлення. По великому розсіюванні досягнутих граничних швидкостей на периферії маховиків можна говорити про те,

що їх конструкції ще далекі від досконалих.

У табл. 4 представляються результати проведених досліджень деяких конструкцій декількох типорозмірів роторів з волокнистих композитів. Ротори являли собою ободкові конструкції, в яких енергомістким є обод, скрутний

момент від якого до валу передавався безпосередньо одиночними спицями, які виконані хордною намоткою.

На основі проведеного теоретичного аналізу і виконаних досліджень можна говорити про те, що використання маховиків є актуальним питанням в задачах акумулювання та зберігання енергії.

Таблиця 4.

Тип ротора	№	Відношення r/R обода	Матеріал	Колова швидкість, м/с	Кінетична енергія, КДж	Питома масова енергомісткість, Дж/кг
А	1	0,8	Склопластик	754	1404	141
	2	0,8	Органопластик	849	1294	218
	3	0,8	Органопластик	967	1728	291
	4	0,8	Органопластик	834	1328	215
	5	0,8	Органопластик	789	1370	188
	6	0,8	Органопластик	847	1312	188
	7	0,8	Вуглепластик + органопластик	742	878	157
Б	8	0,8	Органопластик	713	592,7	205,9
	9	0,76	Вуглепластик	714	890,6	197,5
	10	0,79	Органопластик	725	837	204,7

Представлені в табл.4 результати показують реалізацію повної та питомої масової енергомісткості волокнистих композитів в конструкціях роторів,

що наближаються до вигляду реальних.

Експериментальні результати, отримані при випробуваннях роторів, більш ніж в два рази, нижчі за гранично досягнуті на конструкціях

- ЦНИИ информации, 1982, – 148 с.
6. *Портнов Г.Г.* Влияние низкой сдвиговой прочности полимерного слоя на несущую способность труб из стеклопластиков. // *Механика полимеров.* – 1967. – №3, – С.553-556.
 7. *Портнов Г.Г., Кулаков В.Л.* Разрушение размоткой маховиков из композитов. // *Механика композит. материалов.* – 1979. – №4. – С. 656-662.
 8. *Beacheley N.H., Ascomb C. et al.,* Minimization of Energy Storage Requirements for Internal Combustion Engine Hybrid Vehicles. – ASME Paper 82-WA/DSC-20, 1982.
 9. *Post R.F. and Post S.F.* // *Flyweel, Scientific American.* – 1973. – Vol. 229, №6. P.24-26.

СТАЖУВАННЯ ЗА КОРДОНОМ

У березні 1999 року в Державній агроекологічній академії України побувала делегація, яка представляла дві французькі асоціації: "Дружба без кордонів" та фермерів регіону Пуатусорон. Під час перебування делегації була підписана угода між ДААУ та асоціаціями про стажування студентів у фермерських господарствах та навчання в ліцеї у Франції. Представники делегації провели відбір студентів для стажування. До уваги бралось крім володіння французькою, знання спеціальних предметів, у яких удосконалюватимуться майбутні

професіонали-аграрії. Відбір проходив на конкурсній основі. За його результатами одинадцятьох студентів з різних факультетів одержали змогу пройти двомісячне стажування у фермерських господарствах Франції.

Крім Франції, студенти ДААУ проходять стажування у Великобританії, Німеччині та інших країнах Європи. У 1998-1999 навчальному році кількість студентів, що пройшли стажування за кордоном, перевищила 120 чоловік. Це значно більше, ніж у попередні роки.