

УДК 504:620.9

ВІТРОЕНЕРГЕТИКА - ЦЕ МОЖЛИВІСТЬ ДЛЯ УКРАЇНИ ВИЙТИ З КРИЗИ

Лапшин Ю. С.¹, Машков О. А.¹,Барановська В. С.¹, Голубцова Н. Ю.², Париков Л. С.³¹Державна екологічна академія післядипломної освіти та управління

вул. Митрополита Василя Липківського, 35, 03035, м. Київ,

deabgd@mail.ru;

³СП «Ланко»

вул. Руставелі, 29, 01033, м. Київ

Продовження серії статей про новітні вітроенергетичні технології, які спільно розробляють працівники Державної екологічної академії післядипломної освіти та управління Міністерства екології та природних ресурсів України, СП «Ланко» і Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського. Сутність таких технологій – використання енергії вітру великих висот (5 000 м) за допомогою повітряного «змія»-аеростата, а також запропоновано варіант лесрної багатоступінчатої вітроенергетичної установки, у верхніх сходах якої замість аеростатів функціонуватимуть (забезпечуючи підйомну силу) свосерідні етажерки, полицями яких будуть легкі конструкції (крила планера). Уперше, публікуються математичні теореми, що дозволяють визначити параметри лесру постійного перетину і дві формули, які допоможуть виконати розрахунки лесру рівномірного поперечного перетину. *Ключові слова:* леср, «змія»-аеростат, вітросилова установка, система управління станом конструкції.

Ветроэнергетика - это возможность для Украины выйти из кризиса. Лапшин Ю.С., Машков О.А., Барановская В.Е., Голубцова Н.Ю., Париков Л.Е. Продолжение серии статей о новых ветроэнергетических технологиях, совместно разрабатываемых сотрудниками Государственной экологической академии последипломного образования и управления Министерства экологии и природных ресурсов Украины, СП «Ланко» и Кременчугского национального университета имени Михаила Остроградского. Сущность этих технологий - использование энергии ветра больших высот (5 000 м) с помощью воздушного «змея»-аэростата, а также лесрной многоступенчатой ветроэнергетической установки, в верхних ступенях которой вместо аэростатов будут функционировать (обеспечивая подъемную силу) свособразные этажерки, полками которых будут легкие конструкции (крылья планера). Впервые, публикуются математические теоремы, позволяющие определить параметры лесра постоянного сечения, и две формулы, которые помогут выполнить расчеты лесра равнопрочного поперечного сечения. *Ключевые слова:* леср, «змея»-аэростат, ветросиловые установки, система управления состоянием конструкции.

Wind power - it is an opportunity for Ukraine to overcome the crisis. Lapshin Y.S., Mashkov O.A., Baranovska V.E., Golubtsova N.Y., Parikov L.E. Continuing a series of articles about the new wind power technology jointly developed by employees of the State Ecological Academy of Postgraduate Education and Management of the Ministry of Ecology and Natural Resources of Ukraine, the joint venture "Lanco" and Kremenchuk university. The essence of these technologies - the use of wind energy at high altitudes (5000 m) via the air "snake" -aerostata and lifelines multi-stage wind power plant, in which the upper levels instead of balloons will operate (providing lift) original bookcases, shelves that will be easy design (the glider wings). For the first time, published mathematical theorem to determine the size lifelines constant cross-section, and

two formulas that will perform calculations lifelines equally strong cross-section. Keywords: Guard rails, "snake" -aerostat, wind power installation, the system state management structure.

Вступ

Ця праця продовжує серію статей про новітні вітроенергетичні технології, які спільно розробляють працівники Державної екологічної академії післядипломної освіти та управління Міністерства екології та природних ресурсів України, СП «Ланко» і Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського. Сутність таких технологій – використання енергії вітру великих висот (5 000 м) за допомогою повітряного «змія»-аеростата.

Автори вважають, що енергетика України в подальшому має розвиватися переважно завдяки впровадженню технології отримання біогазу (анаеробне бродіння [1]) і освоєнню нових вітроенергетичних технологій. Щодо інших енергетичних джерел можна зазначити, що геліоенергетичний потенціал України незначний. Крім того, захоплення виробленням електроенергії за рахунок пустель (стрімкий розвиток геліоенергетики у світі, зокрема, і європейські проекти) може призвести до порушення теплового балансу планети Земля. Оскільки саме пустелі охолоджують земну кулю більшою мірою, ніж інші земні поверхні. Атомна енергетика має таку ж ваду (додатковий обігрів земної кулі) і, крім того, забруднює Землю. Мінуси енергетики, що ґрунтуються на спалюванні викопних вуглеводнів, – загальновідомі.

Автори розглядають різні лесрні варіанти, про які йшлося в попередніх працях [2–10]. В останніх досліджено можливості конструкції, у якій раму з вітроколесами і генераторами підтримує на висоті аеростат регульованого обсягу. Аеростат суміщений з гнучким

крилом і, за достатньої сили вітру, працює в режимі гнучкого крила. За цієї умови легкий газ з аеростата перекачується в балон. Балон і компресор можуть бути на висоті або на земній поверхні. У іншому випадку легкий газ від аеростата до балона подається гнучким трубопроводом (рис. 1).

Доведено, що леср постійного по всій його довжині перерізу завдовжки 5 км (для матеріалу з допустимою міцністю на розрив – 1500 кг/см² і питомою вагою 3 т/м³) може обірватися під дією власної ваги. А власне вага лесра рівномірного перерізу п'ятикілометрової довжини, який витримує навантаження 15 000 т, становитиме 25 650 т. Зважаючи на це зроблено висновок, що на сьогодні підкорення великих висот технічно недосяжне. Проте автори дійшли висновку щодо доцільності виконання подальших робіт, спрямованих на зменшення вартості конструкції, підвищення її надійності (продовження терміну служби) і безпеки шляхом побудови багатоступеневої конструкції. У першій частині цієї праці розглянуто один з можливих варіантів конструкції для вітросилової установки потужністю 1 ГВт. Однак розрахована вага матеріалу лесра (сталевий трос) – 168 тис. тонн, вартість якого \$ 504 млн, спонукала до пошуку способів здешевлення конструкції. Про це - в другій частині цієї публікації.

Частина 1. Розрахунок лесра з незмінною по його довжині площею поперечного перерізу

Розглянутий варіант електростанції великої потужності, дослідження якого відображено в [9]. Основну увагу, як і в [9], приділено теоретичному визна-

ченню параметрів лесра. Розглянуто електростанцію великої потужності з використанням енергії вітру великих висот, тому що виготовлення та встановлення малопотужних електростанцій такого типу не компенсує витрат, пов'язаних з територіальним обмеженням транспортних авіаційних коридорів. Основну увагу приділено визначенню параметрів лесра, оскільки його надійність за доступної вартості виготовлення визначає успіх запропонованого заходу.

Визначення параметрів лесра

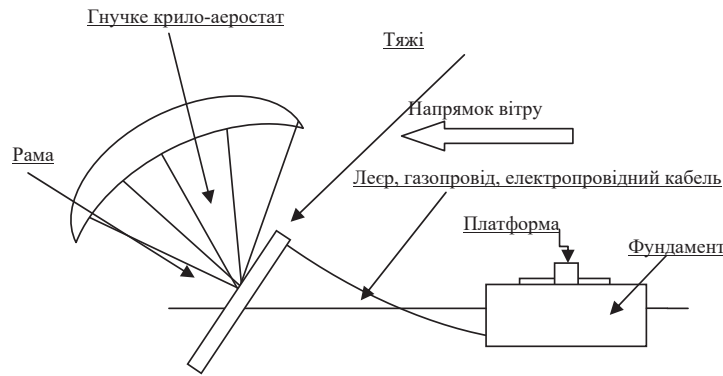
Теоретичні дослідження виконано на підставі таких припущень:

- $F/P \leq 0,3$, де F – сила тиску вітру на вузол, що забезпечує підйом, P – підйомна сила цього вузла,

- питома вага матеріалу лесра – 3 т/м^3 , допустима напруга на розрив цього матеріалу – 1500 кг/см^2 ,

- характеристики вітру: швидкість – 25 м/с , питома вага повітря – $0,8 \text{ кг/м}^3$,

- горизонтальний складник зусилля, що розриває лесра у точках приєднання до лесра кожного підйомного пристрою, дорівнює підйомній силі цього пристрою. Тобто тангенс кута нахилу дотичної до лінії лесра до горизонтальної площини в цій точці дорівнює 1. Потужність вітросилової установки – 1 ГВт , ККД використання енергії вітру – $0,2$.



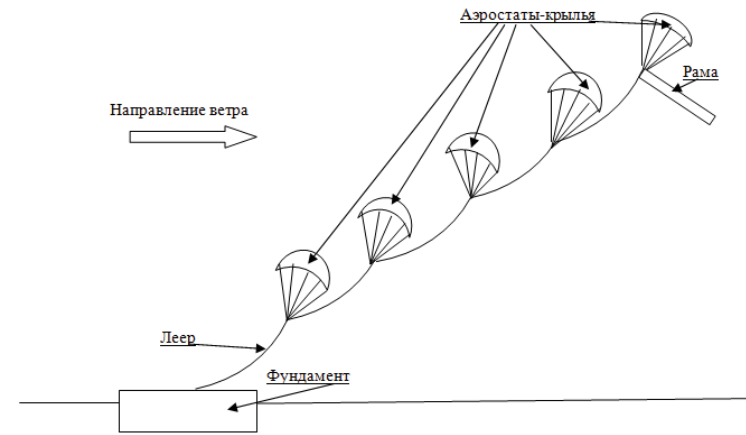
Мал. 1

Схему запропонованої конструкції подано на Мал. 2. Вона не відображає реальної природної картини, оскільки напрямок вітру на вертикалі такої висоти різний для різних висотних відміток, а іноді й (на приземних ділянках) протилежний напрямкові вітру верхніх шарів. Автори розглядають її тому, що вона відображає приклад

максимального навантаження на конструкцію. Визначасмо зусилля, котрі розривають лесра. Питому потужність нашого вітрового потоку M визначається виразом: $M = mV^2/2$, де m – маса повітря, що пройшла через 1 м^2 живого перерізу вітрового потоку за одиницю часу, V – швидкість вітру. У нашому випадку $M = 0,7 * 253/19,62 =$

$557,46 \text{ кг/с} = 5,46 \text{ кВт}$. З урахуванням ККД вітроколес $(0,2)$ одержуємо, що 1 м^2 перехопленого вітропотoku дозволяє отримати $1,09 \text{ кВт}$ електроенергії. Отже, для розв'язання такого завдання потрібно перехопити $0,917 \text{ км}^2$ живого перерізу вітру. Припустимо (в запас розрахунку), що при цьому у вітропотoku відбирається в $2,4$ рази більше енергії, ніж потрібно для її

(електроенергії) отримання, тобто 48% перехопленого повітряного потоку зупиняє система вітроколес. Імпульс сили дорівнює зміні кількості руху: $mV = F_p t$, де F_p – сила тиску вітру на раму з вітроколесами, t – час впливу цієї сили. Отримуємо для нашого випадку: $F_p = 0,3 * 0,7 * 0,917 * 10^6 * 625/9,81 = 20 * 10^6 \text{ кг}$.



Мал. 2

Цей результат отримано за умови перпендикулярного розташування площини рами щодо напрямку вітру. Припустимо, що вага рами з обладнанням на ній становитиме 15 тис. тонн (15 кг на 1 кВт потужності).

Визначасмо зусилля, що розриває лесра. Питому потужність нашого вітрового потоку M обчислюємо за формулою $M = mV^2/2$, де m – маса повітря, що пройшла через 1 м^2 живого перерізу вітрового потоку за одиницю часу, V – швидкість вітру.

У нашому випадку $M = 0,8 * 253 / 19,62 = 637 \text{ кг/с} = 6,246 \text{ кВт}$.

З урахуванням ККД вітроколес $(0,2)$ 1 м^2 перехопленого вітропотoku дозволяє отримати $1,249 \text{ кВт}$ електроенергії. Отже, для розв'язання нашої задачі потрібно перехопити $0,8 \text{ км}^2$ живого перерізу вітру. Припустимо (у запас розрахування), що при цьому у вітропотoku відбирається в півтора рази більше енергії, ніж потрібно для її (електроенергії) отримання, тобто $0,3\%$ перехоплюваного повітряного потоку зупиняє система вітроколес.

Імпульс сили дорівнює зміні кількості руху: $mV = F_p t$, де F_p – сила тиску вітру на раму з вітроколесами, t – час

впливу цієї сили. Отримуємо для нашого випадку:

$F_p = 0,3 \cdot 0,8 \cdot 0,8 \cdot 10^6 \cdot 625 / 9,81 = 12,23 \cdot 10^6$ кг. Цей результат отримано за умови перпендикулярного розташування площини рами щодо напрямку вітру. Під дією вітру рама буде відхилитися.

Мінімальне значення підйомної сили F_p , що виникає при цьому, (за умови збереження номінальної потужності) буде $F_p = (12230/5) \cdot \sin(\beta)$, де β – кут відхилення рами від вертикалі.

Будемо вважати, що така підйомна сила дорівнює вазі рами з розташованим на ній обладнанням. Але при цьому збільшиться в півтора рази розрахункове значення F_p . Для визначення горизонтального складника сили F_r , що розриває лєср у його верхній точці, використовуємо нашу передумову про рівність модулів горизонтального та вертикального складників, а також візьмемо гранично велике значення відношення $F/P = 0,3$. У результаті цих припущень маємо рівність:

$$F_p + 0,3P = P \quad (1.1)$$

Тобто $P = F_p / 0,7 = 12\,230 \cdot 1,5 / 0,7 = 26\,209$ т.

Отже, розрахункове зусилля, що розриває лєср у верхній його точці, визначасмо так: $\sqrt{2 \cdot 262\,092} = 37\,065$ т. За взятих нами властивостей матеріалу лєсра його (лєсра) площа поперечного перерізу повинна бути $2,471 \text{ м}^2$, тобто діаметр канату має бути $1,573$ м. Вага одного погонного метра лєсра – $7,413$ т.

Визначимо вагу лєсра на ділянці його вільного провисання, тобто між точками підвісу, беручи до уваги, що чинне вітрове навантаження на лєср незначне порівняно із запасами розрахунків, уже закладеними вище в нашу розрахункову схему. Отже, розглядає-

мо лєср рівномірного по довжині перерізу. Рівняння лєсра має такий вигляд:

$$dF_y = \left(\eta' S \sqrt{1 + \left(\frac{dy}{dx} \right)^2} \right) dx \quad (1.2)$$

де: F_y – вертикальний складник сили розтягування лєсра, η' – питомо вага матеріалу лєсра, S – площа поперечного перерізу лєсра, x і y , відповідно, горизонтальна і вертикальна декартові координати.

Беремо, що горизонтальний складник розтяжного зусилля – постійний і позначений символом F_0 . Вважаємо, що лєср являє собою абсолютно гнучку нитку. Отже:

$$\frac{F_y}{F_0} = \frac{dy}{dx} \quad (1.3)$$

Звідки:

$$\frac{dF_y}{dx} = F_0 \cdot y'' \quad (1.4)$$

Тоді рівняння нитки лєсра набуває вигляду:

$$F_0 \cdot y' = \eta' S \sqrt{1 + \left(\frac{dy}{dx} \right)^2} \quad (1.5)$$

Позначивши $y' = Y(x)$ і $S/F_0 = p$, одержуємо:

$$Y' = p \sqrt{1 + Y^2} \quad (1.6)$$

У результаті інтегрування цього рівняння маємо:

$$\int \frac{dY}{\sqrt{1+Y^2}} = \ln(Y + \sqrt{1+Y^2}) + C \quad (1.7)$$

Отже,

$$\ln(y' + \sqrt{1 + y'^2}) + C - px = 0 \quad (1.8)$$

Розташувавши початок координат у нижній точці провислої нитки лєсра,

маємо в цій точці: $y' = 0$, $x = 0$. Звідки випливає, що $C = 0$. З (8) отримуємо:

$$Y' = \frac{e^{px} - e^{-px}}{2} \quad (1.9)$$

У результаті інтегрування маємо

$$Y = \frac{e^{px} + e^{-px}}{2p} + C \quad (1.10)$$

Значення сталої інтегрування C визначаємо з умови, що x та y дорівнюють нулю, тобто $C = -1/p$. У результаті

$$Y = \frac{e^{px} + e^{-px}}{2p} - \frac{1}{p} \quad (1.11)$$

У нашому прикладі $p = 3 \cdot 2,471 / 26209 = 0,0002828$. $y = 3536 [(e^{0,0002828x} + e^{-0,0002828x}) / 2 - 1]$ м.
 $y' = 0,5 (e^{0,0002828x} - e^{-0,0002828x})$.

Результати обчислення значень y' і y для десяти точок наведені в таблиці 1.

x, м	y, м	y'
1000	142,2720	0,28660
1500	322,8100	0,43700
2000	580,8220	0,59620
2500	921,1480	0,76738
3000	1350,000	0,95390
3100	1448,110	0,99330
3110	1458,064	0,99736
3120	1468,060	1,00136
4000	2514,120	1,38660
5000	4164,589	1,93460

Аналізуючи наведені в таблиці 1 дані, можна зробити висновок про потребу розв'язати (надалі) задачі оптимізації для визначення величин x і y' точок лєсра, до яких будуть кріпитися аеростати, що підтримують лєср. Ми постулювали, що $y' = 1$ для верхньої точки верхнього ступеня і приз-

начили кількість ступенів – 5. У цьому випадку координати верхньої точки будуть: $x = 3119$ м, $y = 1467$ м. Для нижньої точки: $x = 1798$ м, $y = 467$ м, $y' = 0,44348577$. Отже, вага ділянки лєсра від верхньої його точки до нижньої точки дорівнюватиме: $26209 \cdot (1 - 0,44348577) = 14\,585,68$ т.

А довжина цього відрізка лєсра буде дорівнювати $14\,585,68 / 7,413 = 1967,58$ м.

Другу (зверху) ділянку будемо розглядати на підставі згаданих вище припущень. Вона отримала у спадок від першої ділянки зусилля, що підтримує лєср, величиною $26\,209 \cdot 0,44348577 = 11\,623,318$ т, і горизонтальний складник розтяжного зусилля $26\,209$ т.

Для того щоб зусилля, яке розриває лєср, у верхній точці було спрямоване під кутом 45 градусів до небосхилу, потрібно забезпечити додаткову підйомну силу F_d , яка визначася рівнянням $F_d + 11\,623,318 = 26\,209 + 0,3F_d$.

Звідки $F_d = 20836$ т. Саме така підйомна сила крила-аеростата в точці, що розділяє дві верхні ділянки лєсра. Отже, горизонтальний складник зусилля, що розриває лєср, збільшується на $6\,250,8$ т, а зусилля, що розриває лєср, зростає на $\sqrt{2} \cdot 6250 = 8839,9$ т, тобто становитиме $37\,065 + 8\,839,9 = 45\,904,9$ т.

Аналогічно для третьої, четвертої і п'ятої (нижньої) ділянок отримаємо значення ваги лєсра, відповідно $29\,765$ т, $42\,522$ т, $60\,746$ т. Загальна вага лєсра – становитиме $168\,454$ т. Реальний спосіб зменшити витрати на виготовлення лєсра – це підвищення аеродинамічної якості крил-аеростатів. Якщо вантажопідйомність крила-аеростата буде в 10 разів перевищувати горизон-

тальний складник сили тиску вітру на це крило, то вага лєсра зменшиться і на верхній ділянці становитиме 11 344 т, а на наступних відповідно 12 604, 14 004, 15 560 т і на найнижчій ділянці – 17 290 т. Загальна вага лєсра – 70 802 т.

Очевидно, що на першій (знизу) ділянці ми маємо надлишкову підйомну силу, яка буде відривати лєср від фундаменту, намагаючись підняти останній.

Можна поставити завдання забезпечити нульове значення вертикального складника сили, яка відриває лєср від фундаменту, в точці з'єднання лєсра з фундаментною плитою. За такої умови впливає, що в цій точці $y' = 0$, а у верхній точці лінії лєсра розглянутої ділянки $y = 1000$ м і $y' = F_{\text{л}} / (0,3F_{\text{л}} + 21\,379,0)$, де $F_{\text{л}}$ – вага лєсра першої (знизу) ділянки лєсра. Проте ми це питання не розглядаємо, зазначимо лише, що є потенційний резерв зменшення ваги лєсра, величину якого можна визначити в результаті глибшого дослідження. На цьому етапі опрацювання питання автори, розглядаючи приклад розрахунків з інженерним запасом міцності, вважають факти технічної можливості виготовлення такого лєсра і його працездатності доведеними.

Визначення матеріалу лєсра

Закладені в цьому прикладі характеристики матеріалу лєсра відповідають полімерним волокнам, міцнісні властивості яких погіршуються з часом. Тому автори рекомендують використовувати для виготовлення лєсра сталеві канати (троси), які випускає вітчизняна промисловість. Зокрема, канат сталевий, оцинкований (ГОСТ -

DIN / ISO 7669-80) діаметром 16 мм, вага одного погонного кілометра якого дорівнює 1145,0 кг, а межа міцності (розривне зусилля) - не менш як 24 200 кг.

Частина 2. Визначення параметрів лєсра рівномірного перерізу

Для визначення горизонтального складника сили, що розриває лєср у його верхній точці, візьмемо гранично велике значення відношення $F/P = 0,2$. У результаті цих припущень маємо рівність

$$F_p + 0,2P = F_r. \quad (2.1)$$

Тобто $F_r = 23\,000$ т. Теоретичні дослідження виконано на підставі таких припущень: $F/P \leq 0,2$, де F – сила тиску вітру на вузол, що забезпечує підйом, P – підйомна сила цього вузла;

питома вага матеріалу лєсра – 7,8 т/м³, допустима напруга на розрив цього матеріалу – 4000 кг/см²;

характеристики вітру: швидкість – 25 м/с, питома вага повітря – 0,7 кг/м³; потужність вітросилової установки – 1 ГВт за ККД використання енергії вітру – 0,4.

Визначимо вагу лєсра на ділянці його вільного провисання, тобто між точками підвісу, вважаючи, що чинне на лєср власне вітрове навантаження мале порівняно із запасами розрахунків, закладеними вище в нашу розрахункову схему.

Виведення рівняння осьової лінії лєсра

Умова рівної міцності в кожному поперечному перерізі лєсра виражається такою залежністю:

$$F = \sigma S, \quad (2.2)$$

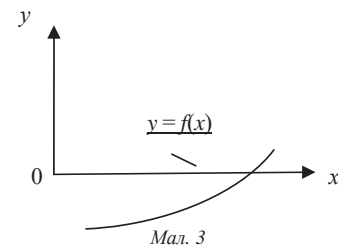
де F – розривне зусилля, σ – допустима напруга, S – площа поперечного перерізу лєсра. Вважаємо лєср гнучкою ниткою, рівняння якої $y = f(x)$. Схематично графік цієї функції подано на рис. 3. Граничні умови на початку координат x, y і y' дорівнюють нулю, горизонтальний складник F дорівнює сумарному вітровому навантаженню і позначений символом F_0 . Вертикальний складник сили F , яку ми позначимо символом F_y , на початку координат дорівнює нулю.

З умови гнучкості нитки випливає:

$$F_y/F_0 = dy/dx, \quad (2.3)$$

звідки

$$\frac{dF_y}{dx} = F_0 \cdot y'' \quad (2.4)$$



Розглянемо елементарну ділянку лєсра завдовжки dl .

$$dl = \sqrt{(dx)^2 + (dy)^2} = \sqrt{1 + (y')^2} dx \quad (2.5)$$

З формули (2.2) випливає

$$dF = \sigma dS. \quad (2.6)$$

Припустимо, що сила тиску вітру на лєср мала порівняно із запасом міцності, який забезпечує наше припущення про перевищення сили тиску на раму над силою, яка зумовлює вироблення електроенергії, (співвідношення 2,4). На цій підставі бічний тиск вітру на лєср не враховуємо. Тобто горизонтальний складник сили F

незмінний на всій ділянці і дорівнює F_0 . Вертикальний складник сили F зміниться в межах елементарної ділянки на величину, що дорівнює вазі цієї елементарної ділянки лєсра. А таке прирощення ваги елементарної ділянки можна вважати рівним:

$$dF_y = \gamma S dl = \gamma S \sqrt{1 + (dy')^2} dx, \quad (2.7)$$

де γ – питома вага матеріалу лєсра.

$$F = \sqrt{(F_0)^2 + (F_y)^2}, \quad (2.8)$$

Отже, з (2.6) і (2.8) маємо

$$\sigma dS = \frac{F_y \gamma y'}{\sqrt{(F_0)^2 + (F_y)^2}} dx \quad (2.9)$$

Звідки

$$\sigma dS = \frac{y' \gamma y'}{\sqrt{1 + (y')^2}} dx. \quad (2.10)$$

З (2.7) і (2.10) випливає

$$\sigma dS = \gamma S dy. \quad (2.11)$$

У результаті розділення змінних та інтегрування маємо

$$\ln(S) = \frac{\gamma}{\sigma} y + C. \quad (2.12)$$

Якщо $y = 0$, то $S = S_0$. Тоді ж, $C = \ln(S_0)$.

Отже, параметри лєсра визначає рівняння

$$\ln\left(\frac{S}{S_0}\right) = \frac{\gamma}{\sigma} y \quad (2.13)$$

Це рівняння можна подати в такій формі:

$$\frac{S}{S_0} = e^{\frac{\gamma}{\sigma} y}. \quad (2.14)$$

Враховуючи, що

$$\frac{S}{S_0} = \sqrt{1 + (y')^2}, \quad (2.15)$$

отримуємо диференціальне рівняння осьової лінії лєсра в такому вигляді:

$$\sqrt{1 + (y')^2} = e^{\frac{\gamma}{\sigma} y} \quad (2.16)$$

Це рівняння із змінними.

$$y' = \sqrt{e^{2\frac{\gamma}{\sigma} y} - 1}. \quad (2.17)$$

$$dy \sqrt{e^{2\frac{\gamma}{\sigma} y} - 1} = dx. \quad (2.18)$$

Але ми не будемо його інтегрувати, оскільки для наших практичних

цілей більш зручними стають його еквіваленти – (13) і (17).

Визначення параметрів леєра (приклад)

Горизонтальний складник розтяжного зусилля у верхній точці першої (зверху) ділянки леєра дорівнює 23 000 т. Зважаючи гнучкість леєра і наших припущень щодо слібкості вітрового навантаження, що безпосередньо діє на леєр, маємо: $S_0 = 23\ 000\ \text{т}/40\ 000\ \text{т}/\text{м}^2 = 0,575\ \text{м}^2$. Результати розрахунків для визначення різних варіантів верхнього ступеня леєра зведено в таблицю 1. Читач може здивуватися. Дійсно, той факт, що для двоступінчатої конструкції в нашому прикладі отримано негативний ефект, який може тільки збільшуватися зі збільшенням кількості ступенів. Ми говоримо про те, що в одноступінчатій конструкції заввишки 5000 м вага леєра становить 56 472 т. А сумарна вага леєра двох ділянок конструкції 2500-метрової висоти дорівнює 59 108 т. У цьому випадку виявилася вада конструкції, спричинена малим значенням y' з наближенням лінії леєра до початку координат. Недолік можна прибрати конструктивним рішенням. Визначимо ділянку леєра відповідної висоти, яка має меншу вагу, тобто визначимо мінімум функції:

$$F_y = F_0 \left(\sqrt{e^{2\frac{y}{\sigma}}(H+y)} - 1 - \sqrt{e^{2\frac{y}{\sigma}}y} - 1 \right), \quad (2.19)$$

де H – висота розглянутої ділянки леєра. Прирівнюючи нулю значення першої похідної правої частини останнього рівняння по y і розв'язуючи отримане рівняння відносно y , одержуємо значення y , відповідне нижній точці ділянки леєра заввишки H :

$$y = \frac{\sigma}{2y} \ln \left(1 + \frac{1}{e^{2\frac{y}{\sigma}}} \right). \quad (2.20)$$

Для $H = 5000$ м отримусмо, що $y = 1061,477$ м. При цьому вага леєра становитиме 54 915 т, тобто зменшиться на 1557 т. Але зусилля на утримання леєра треба довести до 71 386 т, що навряд чи доцільно. Інакша справа з багатоступеневим леєром. Для леєра, що складається з двох ступенів (висота H кожного із ступенів дорівнює 2500 м), довжина відкинutoї нижньої ділянки (визначена за формулою (2.20)) дорівнює 820,6335 м. Зусилля, потрібне для утримання цієї ділянки леєра в робочому стані (F_y), становитиме 37 440,5 т. Вага верхньої ділянки леєра буде дорівнювати 23 323,837 т. Крім того, нижня ділянка леєра (нижній щабель) успадкує від верхньої ділянки підйомне зусилля величиною 14 125,67 т.

Виконані авторами теоретичні дослідження засвідчили, що найкращі показники щодо мінімального приросту ваги леєра на одиницю підйому має точка, у якій

$$y = \frac{\sigma}{2y} \ln(2), \quad (2.21) \\ \text{а } y' = 1.$$

Додаткові пропозиції

Отримані результати наштовхує на думку, що треба теоретично дослідити такий варіант леєрної багатоступінчатої вітроенергетичної установки, у верхніх щаблях якої замість аеростатів будуть функціонувати (забезпечуючи підйомну силу) своєрідні етажерки, полицями яких будуть легкі конструкції, що, за своєю сутністю, є крилами планера. Ці конструкції (маючи малу вагу і хорошу аеродинамічну властивість) буде приводити до робочого стану і підтримувати в оптимальному стані вертолітна система, яка

отримує електроживлення (спочатку) від наземного джерела, а в робочому стані – від власної електросистеми. У процесі приведення установки в робочий стан (і виведення з нього) генератори рами працюють у режимі електродвигунів від наземного джерела живлення, забезпечуючи підйом або м'яку посадку. Слід перевірити ефективність рами, що містить вузли із шарнірним кріпленням окремих ланок.

Висновок

Доведено технічні переваги леєра рівномірного перерізу перед леєром з постійним по довжині перерізом. Перспективи очевидні, але належить виконати величезний обсяг теоретичних і практичних досліджень. І варто зазначити, що розвиток такого напрямку енергетики допоможе Україні в боротьбі за її енергетичну незалежність.

Література

1. Виробництво газу метану і біодобрив з відходів тваринництва і рослинництва Biogazust.blogspot.com
2. Ардашов С.А. Лапшин Ю.С. Аналіз вітроенергетики України і виявлення перспектив её розвитку. Матер. XI Міжнар. Науково-технічна конфер. «Електромеханічні та енергетичні системи, методи моделювання та опти мізації» КрНУ ім. М. Остроградського. Кременчук. 2013.
3. Лапшин Ю.С., Степаненко В.Н., Клепов В.В., Юрченко / В.М.; . Авторское свидетельство СССР № 1000583. Ветроэлектростанция. / заяв. 18.11.1981, опубл. 28.02.1983, Бюл. №8.
4. . Авторское свидетельство СССР № 1164458. Устройство для отклонения ветрового потока. / Лапшин Ю.С., Тромшинская Т.Г.; заявл. 28.05.1982, опубл. 30.06.1985, Бюл. № 24
5. . Лапшин Ю.С. Ардашов С.А. Безбашенная ветроэнергетическая установка. Вестник КрНУ им. М. Остроградского. Выпуск 3, Кременчег. 2013.
6. Лапшин Ю.С. Ардашов С.А. об увеличении производительности гидроэлектростанций за счет перекачки воды из нижнего бьефа в верхний бьеф водохранилищ ветросиловыми установками Вестник КрНУ им. М. Остроградского. Выпуск 5, Кременчег. 2013
7. Лапшин Ю.С., Лихачев О.К., Голубцова Н.Ю., Милецкая С.А. Ветроэнергетическая установка.; Авторское свидетельство СССР № 1021805. Роспатент RU (11) 2045683 (13) С1 (51) 6 F03D11/00 заявл 07.07.1992, опубл. 10.10.1995
8. Лапшин Ю.С. Устройство для отклонения ветрового потока. / ; заяв. 12.09.1980, опубл. 07.06.1983, Бюл. № 21
9. Лапшин Ю.С. К вопросу об эффективности ветроэнергетических технологий, Н.Ж.Екологічні науки, №6, 2014.
10. Лапшин Ю.С. О эффективности леєрных ветроэнергетических технологий, Н.Ж.Екологічні науки, №7, 2015.