

DOI: 10.18372/2310-5461.65.19935

УДК 551.466.6.001.57

К. І. Капітанчук, канд. техн. наук, доц.
Національний авіаційний університет
orcid.org/0000-0003-3605-0977
e-mail: k.kapitanchuk@ukr.net

М. П. Андрійшин, канд. техн. наук, доц.
Національний авіаційний університет
orcid.org/0000-0002-4439-3526
e-mail: andriishinmp@gmail.com

ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ МАЛОЇ ПОТУЖНОСТІ НА РІЧЦІ З ЕНЕРГОПОГЛИНАЛЬНОЮ ПОВЕРХНЕЮ У ВИГЛЯДІ СИНУСОЇДАЛЬНОГО ГЕЛІКОЇДА

Вступ. Україна має потужні ресурси гідроенергії малих річок – загальний гідро-енергетичний потенціал малих річок України становить біля 12,5 млрд. кВт×год., що складає біля 28 % загального гідро-потенціалу всіх річок України. [1].

Головною перевагою малої гідроенергетики є дешевизна електроенергії, генерованої на гідроелектростанціях (далі – ГЕС). Відсутність паливної складової в процесі отримання електроенергії при впровадженні малих ГЕС (далі – МГЕС) дає позитивний економічний та екологічний ефект. Первинним джерелом енергії для малої гідроенергетики є гідропотенціал малих річок.

Верхня межа потужності гідроенергетичного обладнання становить 30 МВт. Згідно міжнародної класифікації до МГЕС відносять ГЕС потужністю від 1 до 30 МВт, до міні-ГЕС – від 100 до 1000 кВт, до мікро-ГЕС – не більше 100 кВт. [1-3].

При використанні гідропотенціалу малих річок Україна може досягти значної економії паливно-енергетичних ресурсів.

Розвиток малої гідроенергетики сприятиме децентралізації загальної енергетичної системи: розв'яже ряд проблем в енергопостачанні віддалених і важко-доступних районів сільської місцевості та керуванні гігантськими енергетичними системами; вирішиться цілий комплекс проблем в економічній, екологічній та соціальній сферах життєдіяльності та господарювання в сільській місцевості, в тому числі і в районних центрах.

МГЕС, міні- ГЕС та мікро-ГЕС можуть стати потужною основою енергозабезпечення для всіх регіонів Західної України, а для деяких районів Закарпатської та Чернівецької областей – джерелом повного автономного енергозабезпечення [1, 3].

Аналіз останніх досліджень і публікацій

За принципом створення напору МГЕС розподіляють на гребельні, дериваційні, змішані (гребельно-дериваційні) та міні-ГЕС на природному напірному фронті (на перепадах каналів, в системах водопостачання, на водо-збірних спорудах та ін. [1].

Науковці Національного авіаційного університету розробили гнучку енергопоглинальну поверхню для морських хвильових електростанцій (далі – ХЕС), яка за принципом перетворення енергії хвиль була спроможна виробляти електроенергію при будь-яких надзвичайних збуреннях поверхні моря.

Відносні переміщення об'ємів води, які виникають при проходженні хвиль, сприймаються робочими елементами станції за допомогою гідродинамічного напору, що створює на робочих валах крутячий момент. Цей момент передається на вал генератора трансмісією. [3, 4].

Конструкція окремих елементів цієї поверхні при трансформації спіралі у площину надана в роботі [5].

За реалізацію проекту ХЕС взялась НВФ «Крок-1» (м. Київ), яка залучила до проекту Інститут гідромеханіки НАН України для випробування експериментальних макетів, Національний університет кораблебудування ім. адмірала Макарова, Київський судно-ремонтно-суднобудівний завод, Bosh Rexroth, Esta LTD, НДЦ Міністерства Оборони України «Державний океанаріум».

Конструкція ХЕС в Україні запатентована і має перспективи для патентування різних модернізацій конструкції в інших країнах

Макет ХЕС та дослідний зразок ХЕС-10 на пірсі перед спуском на воду показано на рис. 1 та рис.2. ХЕС має модульну конструкцію. На одному кілометрі хвильової зони встановлюється до 24 модулів.

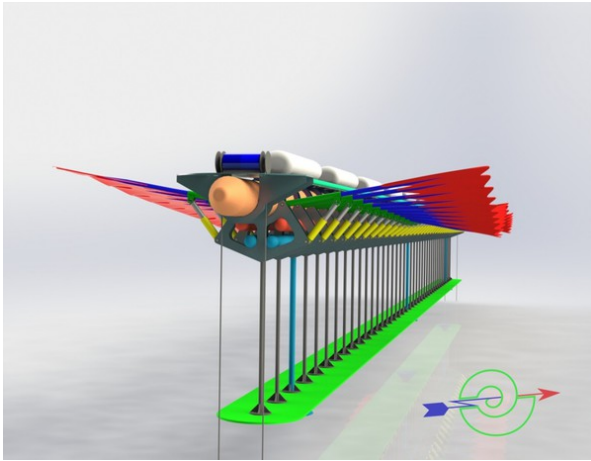


Рис. 1. Хвильова електростанція [4]



Рис. 2. Дослідний зразок ХЕС-10 на пірсі перед спуском на воду

Модулі можна об'єднати в одну ХЕС або в 6 ХЕС, кожна з яких включає 4 модуля.

Доцільність кожного рішення визначається при розробці окремого проєкту з урахуванням всіх факторів.

Для океанів і відкритих морів створені модулі потужністю 1 і 2 МВт, для закритих морів – модулі до 0,5 МВт.

Потужність і розміри модуля визначаються згідно методик, представлених в роботах [7–11].

Надійність функціонування ХЕС в умовах шторму залежить від особливості конструкції щодо здатності занурення на глибину в зону дії хвиль з розрахунковими параметрами станції.

Акваторія, де встановлюється ХЕС, повинна бути повністю відкрита хвилям, глибина повинна бути от 25 метрів і максимально наближена до об'єкту споживання електроенергії.

У 2012 році в рамках проєкту «PLOCAN» в посольстві автономної співдружності Канарські острови в Іспанії українській делегації було запропоновано розробку ХЕС для автономного енергопостачання чотирьох наземних станцій мережі пілотованих космічних польотів (MSFN) для підтримки космічної програми НАСА.

Станція Маспаломас і сьогодні продовжує підтримку супутникового зв'язку як частина мережі ЕКА [12, 13].

Портові інфраструктури для автономного забезпечення енергією проєкту «PLOCAN» показано на рис. 3.

Отже, виникла необхідність в удосконаленні методики визначення потужності ХЕС з гнучким енергопоглинальним елементом в умовах інтенсивності морської течії Атлантичного океану, яка рухається з півночі на південь вздовж Піренейського півострова та Північно-Західної Африки, та одночасним коливанням поверхневих хвиль.

В подальшому методика дозволяла проводити розрахунки з визначення енергетичних і геометричних параметрів ХЕС без впливу дії поверхневих хвильових коливань, тобто використовувати її для створення МГЕС.



Рис. 3. Портові інфраструктури для автономного забезпечення енергією проєкту «PLOCAN»

У 2014 році військова агресія Росії відносно України унеможливила реалізацію проєктів, отже розробки ХЕС були призупинені.

Мета статті (постановка завдання)

Синусоїдальний гелікоїд, який створюється із плоскої стрічки при обертанні її відносно осі (валу) поверхневими хвилями на морях, зданий створювати обертальний момент і передавати потужність до генератора електроенергії.

Якщо штучно створити синусоїдальний гелікоїд під реальну швидкість потоку в річці, то можна отримати той же ефект, а геометрія гелікоїда буде оптимальною – створено природою. Поверхня енергопоглинального елемента мікро-ГЕС в процесі її пересування під дією енергії потоку води розраховується на один режим найбільшого навантаження її основних вузлів.

Для прийняття рішення на виготовлення окремих вузлів станції після встановлення необхідної потужності від замовника, енергетичного потенціалу річки безпосередньо на місці встановлення станції (швидкість течії, глибина, обмеження за довжиною та ін.) необхідно розробити методику визначення енергетичних показників і геометричних розмірів мікро-ГЕС.

Постановка задачі на дослідження

Згідно з методиками [7, 9] шляхом розв’язання зворотної задачі необхідно визначити енергетичні характеристики п’яти мікро-ГЕС довжиною від 1,25 м до 3,34 м, шириною енергопоглинальної поверхні b при $b/R = 0,5$ з радіусами обертання $R = 0,3; 0,4; 0,5; 0,6$ та $0,8$ м при швидкості потоку в річці в межах 2...5 м/с.

Результати досліджень

Енергетичні показники і геометричні розміри мікро-ГЕС залежать від траєкторії руху кожної окремо взятої елементарної точки поверхні енергопоглинального елемента станції в процесі її пересування під дією енергії потоку води.

В загальному вигляді енергопоглинальний елемент представляє собою синусоїдальну гвинтову поверхню – синусоїдальний гелікоїд, рівняння якого має вигляд:

$$y_i = R_i \sin \varphi, \quad z_i = R_i \cos \varphi, \\ x = \frac{\lambda \varphi}{2\pi} \quad \text{або} \quad \frac{y_i}{z_i} = \operatorname{tg} \frac{2\pi x}{\lambda},$$

де x, y, z – повздовжня, поперечна і вертикальна осі координат, λ – довжина повного витка.

Різниця площ від проекцій зовнішнього та внутрішнього радіусів гелікоїда на усі площини системи координат є проекції площі енергопоглинального елемента на всі осі.

В площині yz – проекція площі являє собою кільце з радіусами R та $R-b$, де b – ширина енергопоглинального елемента.

В площині xz – проекція площі уявляє собою прямокутник з довжиною l і шириною b .

Перепад тиску на поверхні формується як наслідок різних умов обтікання передньої до фронту потоку і «тильної» сторони кожного окремого сегмента енергопоглинального елемента.

З «тильної» сторони відбувається складний рух, де потік переміщується разом із фронтом і обертається з кутовою швидкістю в площині перпендикулярній напрямку потоку.

Перепад тиску на поверхні визначається за основними рівняннями гідравліки і газової динаміки (з використанням рівнянь Бернуллі і Ейлера).

Як наслідок різниця тиску на поверхні енергопоглинального елемента змінюється вздовж радіуса пропорційно квадрату коловою швидкості u_i

(за законом $\Delta P_i = \rho u_i^2 / 2$), тобто від 1,8 (на зовнішньому радіусі) до 0,9 (на внутрішньому радіусі) величини швидкісного напору річки.

Сила, створена різницею тиску на всю поверхню енергопоглинального елемента в межах одного витка, визначається шляхом інтегрування різниці тиску на i -му елементі поверхні на площу всієї поверхні енергопоглинального елемента, тобто

$$F = \int_{R-b}^R \int_{\beta_b}^{\beta_R} \frac{\rho V^2}{2} \operatorname{rtg} \beta \operatorname{rd}r d\beta,$$

де V – швидкість потоку річки, β – кут розвертки гелікоїда на площину xu .

Проекція цієї сили на площину yz створює крутий момент вздовж осі x . Частота обертання безпосередньо залежить від швидкості потоку.

Повний оберт будь-яка точка на поверхні синусоїдального гелікоїда проходить за час проходження відстані, яка дорівнює довжині одного витка, тобто

$$\operatorname{tg} \beta_i = u_i / V \quad \text{або} \quad \operatorname{tg} \beta_i = \omega r_i / V,$$

де $\omega = \pi n / 30$ – колова частота обертання, n – частота обертання за хвилину.

Розрахунок частоти обертання при змінній швидкості потоку і різних габаритних розмірах енергопоглинального елемента надано на рис. 4.

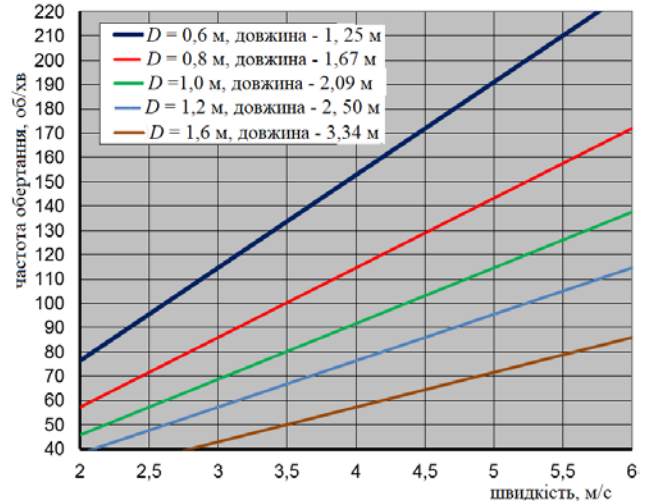


Рис. 4. Залежність частоти обертання від швидкості потоку та різних габаритних розмірах енергопоглинального елемента

Довжина одного витка робочої поверхні – крок гвинтової лінії. Результуюча сила від дії тиску сконцентрована на відстані 2/3 висоти сегмента енергопоглинального елемента створює момент сили відносно осі – плече.

Момент обертання від дії результуючої сили і потужність одного витка визначають як

$$M = F_{yz} RA \quad \text{і} \quad N = M \omega,$$

де RA – плече результуючої сили F_{uz} відносно осі x при $A=1-b/3R$.

Попередні розрахунки для прийняття рішення на виготовлення окремих вузлів станції представлені на рис. 5 та рис. 6.

Після встановлення необхідної потужності від замовника необхідно визначити енергетичний потенціал річки безпосередньо на місці встановлення станції (швидкість течії, глибина, обмеження за довжиною та ін.), діаметр робочої частини установки і тип генератора.

Конструкція модульного типу передбачає можливість створення будь-якої потужності (в межах енергетичного потенціалу річки) шляхом збільшення кількості модулів.

Передбачається, що ширина річки значно перевищує діаметр енергопоглинального елемента установки, що у відкритій термодинамічній системі приводить до відновлення втраченої енергії в окремій області простору за рахунок енергії усього простору.

Кількість енергії, що відбирається, повинна бути «розумною», тому що можливим є підвищення рівня річки вниз за течією і зниження швидкості потоку.

Наприклад, мікро-ГЕС потужністю 50 кВт складається з таких основних елементів: робочого органу, гідромаховика, силового блока, платформи, силового кабелю, берегового пульта контролю і керування, тросів кріплення.

Робочий орган призначений для перетворення енергії потоку в енергію обертання робочого вала і складається з робочого вала, двох енергопоглинальних елементів та роз'ємних фланців для їх встановлення.



Рис. 5. Залежність потужності одного витка синусоїдального гелікоїда від швидкості потоку та різних габаритних розмірів енергопоглинального елемента

Конструкція розрахована на передачу крутного моменту 6000 Нм Робочий вал виготовлюється з нержавіючої труби 120x10. Конструкція кінців вала передбачає установку його в опори. Вздовж вала з кроком 400 мм приварюються фланці з отворами для кріплення роз'ємного фланця.

Роз'ємний фланець уявляє собою кільце з нержавіючої сталі розрізане вздовж діаметра, яке має з однієї сторони перерізу вісь обертання півкільця, а з іншої – замок кріплення.

На кожному півкільці в площині, перпендикулярній перерізу, приварені втулки, в які встановлюються хвостовики лопатей енергопоглинального елемента. Крім цього півкільця мають отвори для кріплення роз'ємний фланця до фланцю робочого вала.

Енергопоглинальний елемент складається з окремих з'єднувальних між собою лопатей в гнучке повздовжнє тіло. Лопаті мають хвостовики для кріплення у втулках роз'ємного фланця. Між собою вони кріпляться так, що площини легко можуть переміщуватися відносно друг друга, але з високою пружністю протистояють навантаженням перпендикулярним їх площинам.

Таке з'єднання лопатей дозволяє енергопоглинальному елементу легко приймати форму просторової спіралі.

Для мікро-ГЭС потужністю 50 кВт розрахунковим навантаженням для проектування лопатей є максимальний згинальний момент, який передається однією лопаттю – 500 Нм.

Лопаті виготовляють з армованого скло-пластика з окремими фрагментами з поліуретану, для чого створені спеціальні форми.

Передбачена вага робочого органу до 300 кг.

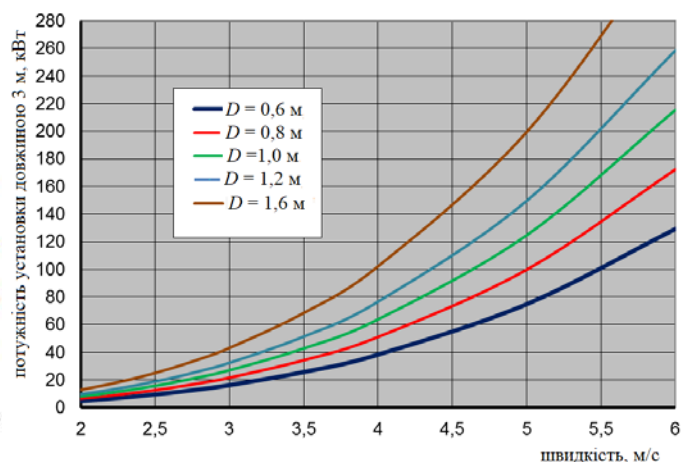


Рис. 6. Залежність потужності енергетичної установки довжиною 3 м від швидкості потоку та різних габаритних розмірів енергопоглинального елемента

Висновки

Поверхня енергопоглинального елемента мікро-ГЕС в процесі її пересування під дією енергії потоку води розраховується на один режим найбільшого навантаження її основних вузлів. Для прийняття рішення на виготовлення окремих вузлів станції після встановлення необхідної потужності від замовника, після вивчення енергетичного потенціалу річки безпосередньо на місці встановлення станції (швидкість течії, глибина, обмеження за довжиною та ін.) розроблено методику визначення енергетичних показників і геометричних розмірів мікро-ГЕС.

Доказано можливість використання мікро-ГЕС з такими перевагами:

- наявність гнучкого самоадаптованого енергопоглинального елемента, який змінює свою форму під впливом сили потоку річки;

- конструкція станції пронизлива і має можливість заглиблення на глибину, отже, працювати з зимою пору року під поверхневою кригою річки;

- основні конструктивні елементи станції виконані з композитних полімерних матеріалів.

Представлено математичні та графічні залежності з метою визначення діаметру робочої частини установки і типу генератора.

Перспективи подальших досліджень

Впровадження результатів наукових досліджень зі створення мікро-ГЕС необхідно спрямувати на розробку системи автоматичного керування, визначення показників надійності, ресурсу, діагностування стану вузлів та технічного обслуговування.

Подальші наукові дослідження потрібно спрямувати на вивчення руху енергопоглинальних елементів мікро-ГЕС в умовах роботи під льодом взимку та при повені, спричиненої загальним потеплінням весною.

Необхідна розробка пристрою відключення споживачів у випадку перевищення потужності генераторів при виникненні нестандартних ситуацій.

ЛІТЕРАТУРА

- [1] Атлас енергетичного потенціалу відновлюваних джерел енергії України / за заг. ред. С.О. Кудрі. Київ: Інститут відновлюваної енергетики НАН України. 2020. 82 с. URL: <https://www.ive.org.ua/wp-content/uploads/atlas.pdf>
- [2] Капітанчук К. І., Сотников А. В., Овсянкін В. В. Один із шляхів незалежного енергетичного забезпечення підрозділів Збройних Сил України приморського базування. *Арсенал–XXI*. 2007. №1. С. 37–41. URL: <https://er.nau.edu.ua/handle/NAU/39936>
- [3] Капітанчук К. І., Овсянкін В. В. Досвід розробки та впровадження хвильової електричної станції. Матеріали XIV Міжнар. наук.-тех. конф. АС Промислова гідраліка і пневматика. Одеса: «ГЛОБУС-ІПЕС». 2013. С. 126–127. URL: <https://er.nau.edu.ua/handle/NAU/39936>
- [4] Khvil's desalination plants and power plants of Ovsyankin. URL: <https://wateractionhub.org/projects/1088/d/wave-desalination-and-power-plants-designed-by-ovsia/>
- [5] Капітанчук К. І., Андріішин М. П. Розрахунок подовження енергопоглинального елемента морської хвильової електростанції трансформації спіралі у площину. *Наукоємні технології*. № 3 (39). 2018. С. 387–392. doi.org/10.18372/2310-5461.39.13097
- [6] Патент України № 108506. Хвильова електростанція Овсянкіна для водних потоків. МПК F03B13/12. URL: <https://iprop-ua.com/inv/hx3557k4/>
- [7] Капітанчук К. І., Андріішин М. П. Методика визначення потужності морської хвильової електростанції з гнучким енергопоглинальним елементом. *Наукоємні технології*. № 1 (45). 2020. С. 78–84. doi.org/10.18372/2310-5461.45.14574
- [8] Капітанчук К. І., Андріішин М. П. Методика визначення сил та моментів, що діють на поверхню енергопоглинального елемента морської хвильової електростанції при різному збуренні поверхні моря. *Наукоємні технології*. №4 (40). 2018. С. 443–449. doi.org/10.18372/2310-5461.40.13270
- [9] Греков П. І., Капітанчук К. І., Овсянкін В. В. Методика розрахунку глибини занурення морської енергетичної станції при збільшенні висоти хвиль. *Вісник НАУ*. 2006. № 4(30). С. 166–168. doi.org/10.18372/2306-1472.30.1399
- [10] Капітанчук К. І., Андріішин М. П. Характеристики потужності хвильової електростанції за умови збільшення амплітуди коливання поверхні моря. *Наукоємні технології*. № 1 (53). 2022. С. 49–57. doi.org/10.18372/2310-5461.53.16508
- [11] Капітанчук К. І., Андріішин М. П. Характеристики потужності хвильової електростанції з гнучкою енергопоглинальною поверхнею в умовах внутрішнього моря. *Наукоємні технології*. № 1(61). 2024. С. 94–101. doi.org/10.18372/2310-5461.61.18517
- [12] Офіційний сайт ESA. URL: https://www.esa.int/Enabling_Support/Operations/ESA_Ground_Stations/Maspalomas_station
- [13] Океанічна платформа Канарських островів (PLOCAN). Офіційний сайт. URL: <http://obsplatforms.plocan.eu/>

Капітанчук К. І. Андрійшин М. П.
ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ МАЛОЇ ПОТУЖНОСТІ НА РІЧЦІ
З ЕНЕРГОПОГЛИНАЛЬНОЮ ПОВЕРХНЕЮ У ВИГЛЯДІ СИНУСОЇДАЛЬНОГО
ГЕЛІКОЇДА

При використанні гідропотенціалу малих річок Україна може досягти значної економії паливно-енергетичних ресурсів. Розвиток малої гідроенергетики сприятиме децентралізації загальної енергетичної системи: розв'яже ряд проблем в енергопостачанні віддалених і важкодоступних районів сільської місцевості та керуванні гігантськими енергетичними системами; вирішиться цілий комплекс проблем в економічній, екологічній та соціальній сферах життєдіяльності та господарювання в сільській місцевості, в тому числі і в районних центрах.

*Загальний гідроенергетичний потенціал малих річок України становить біля 12,5 млрд. кВт*год., що складає біля 28 % загального гідропотенціалу всіх її річок. Міні-ГЕС та мікро-ГЕС можуть стати потужною основою енергозабезпечення для всіх регіонів Західної України, а для деяких районів Закарпатської та Чернівецької областей – джерелом повного автономного енергозабезпечення.*

У 2004 році науковці Національного авіаційного університету презентували розробку гнучкої енергопоглинальної поверхні для хвильової електростанції, яка за принципом перетворення енергії хвиль принципово відрізнялась від існуючих та була спроможна виробляти електроенергію при будь-яких надзвичайних збуреннях поверхні моря.

Синусоїдальний гелікоід, який створюється із плоскої стрічки при обертанні її відносно осі (валу) поверхневими хвилями на морях, здатний створювати обертальний момент і передавати потужність до генератора електроенергії.

Якщо штучно створити синусоїдальний гелікоід під реальну швидкість потоку в річці, то можна отримати той же ефект, а геометрія гелікоїда буде оптимальною – створено природою.

Поверхня енергопоглинального елемента мікро-ГЕС в процесі її пересування під дією енергії потоку води розраховується на один режим найбільшого навантаження її основних вузлів.

Для прийняття рішення на виготовлення окремих вузлів станції після встановлення необхідної потужності від замовника, енергетичного потенціалу річки безпосередньо на місці встановлення станції (швидкість течії, глибина, обмеження за довжиною та ін.) необхідно провести розрахунки згідно методики визначення енергетичних показників і геометричних розмірів мікро-ГЕС.

Ключові слова: річкова електростанція, енергопоглинальна поверхня, енергетичні параметри.

Капитанчук К., Andriyishyn M.
DETERMINATION OF PARAMETERS OF A SMALL POWER PLANT ON A RIVER WITH
AN ENERGY-ABSORBING SURFACE IN THE FORM OF A SINUSOIDAL HELICOID

By using the hydropower potential of small rivers, Ukraine can achieve significant savings in fuel and energy resources. The development of small hydropower will contribute to the decentralization of the overall energy system: it will solve a number of problems in the energy supply of remote and hard-to-reach rural areas and the management of giant energy systems; a whole range of problems in the economic, environmental and social spheres of life and management in rural areas, including in district centers, will be solved.

The total hydropower potential of small rivers in Ukraine is about 12.5 billion kWh, which is about 28% of the total hydropower potential of all its rivers. Mini-hydroelectric power plants and micro-hydroelectric power plants can become a powerful basis for energy supply for all regions of Western Ukraine, and for some areas of Transcarpathian and Chernivtsi regions - a source of complete autonomous energy supply.

In 2004, scientists from the National Aviation University presented the development of a flexible energy-absorbing surface for a wave power plant, which, according to the principle of wave energy conversion, was fundamentally different from existing ones and was able to generate electricity during any extraordinary disturbances of the sea surface.

A sinusoidal helicoid, which is created from a flat ribbon when it rotates relative to its axis (shaft) by surface waves on the seas, is able to create a torque and transmit power to an electricity generator. If you artificially create a sinusoidal helicoid for the real flow speed in a river, you can get the same effect, and the geometry of the helicoid will be optimal - created by nature.

The surface of the energy-absorbing element of a micro-hydroelectric power plant in the process of its movement under the action of the energy of the water flow is calculated for one mode of the highest load of its main nodes.

To make a decision on the manufacture of individual components of the station, after determining the required capacity from the customer and the energy potential of the river directly at the site of the station (flow velocity, depth, length restrictions, etc.), it is necessary to carry out calculations according to the methodology for determining energy indicators and geometric dimensions of micro-hydroelectric power plants.

Keywords: run-of-river power plant, energy absorbing surface, energy parameters.

Стаття надійшла до редакції 20.02.2025 р.

Прийнято до друку 26.03.2025 р.