

УДК 621.311

**А.И.Яковлев**, докт.техн.наук, **В.А.Жаданова** (Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е.Жуковского "ХАИ", Харьков)

### **Бесплотинная гидроустановка ленточного типа, использующая при своей работе силу лобового сопротивления**

*Рассмотрены конструкция и расчет бесплотинной речной гидроустановки, в основу которой положен принцип лобового сопротивления. Построена характеристика зависимости коэффициента использования энергии течения воды в зависимости от коэффициента быстроходности движения гибкой ленты с рабочими лопастями.*

**Ключевые слова:** бесплотинная речная гидроустановка, коэффициент использования энергии текущей воды, коэффициент быстроходности, коэффициент сопротивления.

*Розглянуто конструкцію та розрахунки безгреблевої річкової гідроустановки, в основу якої покладено принцип лобового опору. Побудовано характеристику залежності коефіцієнта використання енергії течії води в залежності від коефіцієнта швидкохідності руху гнучкої стрічки з робочими лопатями.*

**Ключові слова:** безгреблева річкова гідроустановка, коефіцієнт використання енергії текучої води, коефіцієнт швидкохідності, коефіцієнт опору.

**Введение.** К главным нетрадиционным возобновляемым источникам энергии, которые считаются перспективными для Украины в ближайшие десятилетия, относят биомассу, солнечную, геотермальную, ветровую энергию, а также энергию малых водотоков [2].

Малая гидроэнергетика принадлежит к проверенной временем надежной технологии производства электрической энергии во всем мире. В нашей стране находится в эксплуатации 67 малых гидроэлектростанций (МГЭС) общей мощностью около 107 МВт [1]. Они характеризуются гарантированным возобновляемым энергоресурсом, соответствуют комплексу экологических требований по сохранению биологических, геоморфологических и гидрохимических процессов в русле и долине реки.

Прогнозируется, что технически достижимый годичный энергетический потенциал использования нетрадиционных возобновляемых источников энергии в Украине в перерасчете на условное топливо будет составлять в 2030 году около 79 млн т [2].

Динамическому развитию малой гидроэнергетики способствуют такие обстоятельства, как высокий уровень технологий производства гидро-

энергетического оборудования и относительно быстрая окупаемость.

**Постановка задачи.** Гидроэнергетика базируется на использовании энергии воды в качестве первичного источника энергии. Кинетическая энергия движения воды с помощью технических средств (гидроустановок) переходит в кинетическую энергию вращения генератора. По сравнению с традиционными технологиями выработки электроэнергии, малая энергетика имеет уникальные маневренные свойства, высокие показатели надежности и значительный эксплуатационный ресурс.

Актуальной проблемой гидроэнергетики является разработка конструкций гидроустановок, которые имеют большую надежность, долговечность, большой коэффициент преобразования энергии движения воды, а также малую стоимость, просты в производстве, обслуживании и эксплуатации.

Основными тенденциями решения вышеперечисленных проблем является создание новых конструкций гидроустановок и улучшение уже существующих. Далее в статье будут показаны основные характеристики малой речной гидроустановки ленточного типа.

**Бесплотинная гидроустановка ленточного типа, использующая при своей работе силу лобового сопротивления.**

Механическая мощность движения ленты:

$$P = F_m \cdot V_{лент}, \quad (1)$$

где  $F_m$  – сила тяги, действующая на ленту и направленная вдоль ее движения;  $V_{лент}$  – скорость движения ленты.

Силу тяги ленты  $F_m$  в первом приближении можно рассматривать как произведение силы тяги каждой лопасти на общее число лопастей, находящихся в рабочей зоне ленты.

Таким образом,

$$F_m = F_{м.л.} \cdot N_l, \quad (2)$$

где  $F_{м.л.}$  – сила тяги одной лопасти;  $N_l$  – количество лопастей в рабочей зоне.

Сила тяги лопастей  $F_{м.л.}$  определяется следующим образом. В направлении движения ленты проекция скорости воды  $V$  равна  $V \cdot \cos \beta$ .

Во время движения ленты со скоростью  $V_{лент}$  скорость водного потока, который действует на лопасть, составляет:  $V \cdot \cos \beta - V_{лент}$ .

Сила водного потока  $F_l$ , который набегает на лопасть, равна скоростному напору, умноженному на площадь лопасти  $A_l$ :

$$\begin{aligned} F_l &= \frac{\rho(V \cdot \cos \beta - V_{лент})^2}{2} \cdot A_l = \\ &= \frac{\rho(V \cdot \cos \beta - V_{лент})^2}{2} \cdot a \cdot b, \end{aligned} \quad (3)$$

где  $\rho$  – плотность воды, кг/м<sup>3</sup>;  $a$  и  $b$  – соответственно высота и ширина лопасти, м.

Сила тяги лопасти отличается от силы набегавшего потока воды коэффициентом сопротивления  $C_D$ :

$$F_{м.л.} = C_D \cdot F_l, \quad (4)$$

или

$$F_{м.л.} = C_D \cdot \frac{\rho(V \cdot \cos \beta - V_{лент})^2}{2} \cdot a \cdot b. \quad (5)$$

Таким образом, с учетом (2) и (5) сила тяги ленты равна:

$$F_m = C_D \cdot \frac{\rho(V \cdot \cos \beta - V_{лент})^2}{2} \cdot a \cdot b \cdot N_l. \quad (6)$$

Принимается, что мощность гидроустановки –  $P$ , Вт, а зависимость коэффициента мощности от быстроходности  $C_p(z)$  – безразмерная.

Поток воды с поперечным сечением  $S$  несет в себе кинетическую энергию  $\frac{mV^2}{2}$ . При условии

$U = \frac{1}{3}V$  реализуется максимальный коэффициент использования энергии водяного потока, обтекающего пластину, перпендикулярную этому потоку [3]. Здесь  $U$  – скорость движения ленты, а  $V$  – скорость потока.

Секундная работа поверхности при действии на нее силы водяного потока определяется из следующих соображений. Исследование проводится в предположении, что при конструировании ленточной установки выдержано условие незатенения лопастей друг другом, а именно: высота лопасти  $a$ , шаг лопастей  $l$  и угол наклона плоскости рабочей зоны ленты  $\beta$  связаны соотношением:

$$\frac{a}{l} = \operatorname{tg} \beta. \quad (7)$$

Тогда количество лопастей, которые находятся в рабочей зоне длиной  $L$ , равно:

$$N_l = \frac{L}{l} = \frac{L}{a} \cdot \operatorname{tg} \beta. \quad (8)$$

Рабочая площадь ленты  $A$  определяется как площадь той ее части, которая находится ниже барабанов:

$$A = L \cdot B, \quad (9)$$

где  $B$  – рабочая ширина ленты.

В предположении, что ширина ленты равна ширине лопасти:

$$B = b \quad (10)$$

и с учетом выражений (7)–(10) имеем:

$$\begin{aligned} F_m &= C_D \cdot \frac{\rho(V \cdot \cos \beta - V_{лент})^2}{2} \times \\ &\times a \cdot B \cdot \frac{L}{a} \cdot \operatorname{tg} \beta. \end{aligned} \quad (11)$$

Тогда по (1) и с помощью (7)–(11) получается:

$$P = F_m \cdot V_{лент} = C_D \cdot \frac{\rho \cdot (V \cdot \cos \beta - V_{лент})^2}{2} \times A \cdot \operatorname{tg} \beta \cdot V_{лент}. \quad (12)$$

Схема гидроэлектрической установки ленточного типа представлена на рис. 1, основными параметрами гидроустановки ленточного типа являются геометрические и кинетические:

- 1) ширина  $b$  и высота  $a$  лопасти, м;
- 2) количество лопастей  $N_l$  (о.е.);
- 3) рабочая длина  $L$  и ширина  $B$  ленты, м;
- 4) угол наклона  $\beta$  плоскости ленты к горизонтали, град.;
- 5) шаг лопастей  $l$ , м;
- 6) площадь входа, перпендикулярная потоку,  $S$ , м<sup>2</sup>.

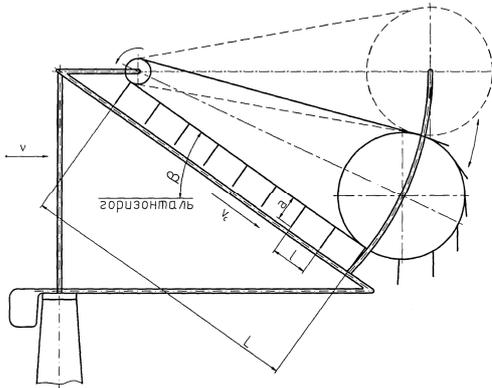


Рис. 1. Схема гидроэлектрической установки ленточного типа.

По аналогии, для гидроустановки ленточного типа можно заключить, что максимальный режим достигается при соотношении:

$$V_{лент} = \frac{V \cdot \cos \beta}{3}, \quad (13)$$

где  $V$  – скорость потока;  $V \cdot \cos \beta$  – проекция скорости потока на направление движения ленты. С учетом соотношения (13) формула (12) принимает вид:

$$P = C_D \cdot \frac{\rho \left( V \cdot \cos \beta - \frac{V \cdot \cos \beta}{3} \right)^2}{2} \times A \cdot \operatorname{tg} \beta \cdot \frac{V \cdot \cos \beta}{3} = \frac{4}{27} \cdot C_D \cdot \frac{\rho V^3}{2} \cdot A \cdot \sin \beta \cdot \cos^2 \beta. \quad (14)$$

Максимум функции:

$$y(\beta) = \sin \beta \cdot \cos^2 \beta.$$

Приравнявая нулю производную:

$$\frac{dy}{d\beta} = \cos \beta \cdot \cos^2 \beta +$$

$$+ \sin \beta \cdot 2 \cos \beta \cdot (-\sin \beta) = 0,$$

или, сокращая на множитель  $\cos \beta$ , получается:

$$\cos^2 \beta - 2 \cdot \sin^2 \beta = 0. \quad (15)$$

Уравнение (15) представим в виде:

$$2 \sin^2 \beta = \cos^2 \beta. \quad (16)$$

Левая и правая части делятся на  $\cos^2 \beta$ :

$$2 \operatorname{tg}^2 \beta = 1.$$

Отсюда:

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{1}{\sqrt{2}} \quad (17)$$

(отрицательное значение  $\operatorname{tg} \beta$  не рассматривается).

Итак, оптимальное значение угла  $\beta$  равно:

$$\beta_{opt} = \arctg \left( \frac{1}{\sqrt{2}} \right) = 35,26^\circ \approx 35^\circ 16',$$

а максимальное значение функции  $y(\beta)$  имеет вид:

$$y(\beta_{opt}) = \sin \beta_{opt} \cdot \cos^2 \beta_{opt}.$$

Формулы выражения  $\sin \beta$  и  $\cos \beta$  через  $\operatorname{tg} \beta$  имеют вид:

$$\sin \beta = \frac{\operatorname{tg} \beta}{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \beta}}; \quad (18)$$

$$\cos \beta = \frac{1}{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \beta}}. \quad (19)$$

При значении  $\beta = \beta_{opt}$ , т.е.  $\operatorname{tg} \beta_{opt} = \frac{1}{\sqrt{2}}$ :

$$\sin \beta_{opt} = \frac{1}{\sqrt{3}} \approx 0,5774; \quad (20)$$

$$\cos \beta_{opt} = \sqrt{\frac{2}{3}} \approx 0,8165. \quad (21)$$

Входная площадь  $S$ , перпендикулярная водяному потоку, равна при  $\beta = \beta_{opt}$ :

$$S = A \cdot \sin \beta_{opt} = A \cdot \frac{1}{\sqrt{3}}. \quad (22)$$

Отсюда получим:

$$A = \sqrt{3} \cdot S. \quad (23)$$

Подставляя оптимальное значение  $\beta$  и  $A$ , выраженное через  $S$  по формуле (23), в формулу (14) для мощности  $P_{\max}$ , получается:

$$P_{\max} = \frac{4}{27} \cdot C_D \cdot \frac{\rho V^3}{2} \cdot S \approx 0,09877 \cdot C_D \cdot \frac{\rho V^3}{2} \cdot S, \text{ Вт.} \quad (24)$$

При  $C_D = 1,5$  максимальная величина  $P_{\max}$ , достигаемая для лопастей, например, стандартного чашечного анемометра:

$$P_{\max} = 1,5 \cdot 0,09877 \cdot \frac{\rho V^3}{2} \cdot S = 0,1482 \cdot \frac{\rho V^3}{2} \cdot S. \quad (25)$$

Максимальная мощность гидроустановки ленточного типа достигается при угле установки плоскости ленты  $\beta_{\text{opt}} = 35,26^\circ \approx 35^\circ 16'$  и составляет:

$$P_{\max} = \frac{4}{27} \cdot \frac{2}{3} \cdot C_D \cdot \frac{\rho V^3}{2} \cdot S.$$

Для определения коэффициента мощности  $C_p$  следует сравнить формулу (24) с классическим выражением для мощности гидроустановки:

$$P = C_p \cdot \frac{\rho V^3}{2} \cdot S, \quad (26)$$

в результате имеем:

$$C_p = \frac{4}{27} \cdot \frac{2}{3} \cdot C_D = C_p \approx 0,09877 \cdot 1,5 = 0,1482; \quad (27)$$

$$C_p \approx 0,09877 \cdot 1,5 = 0,1482.$$

При построении зависимости коэффициента мощности  $C_p$  от быстроходности  $Z$  следует учесть, что

$$Z = \frac{V_{\text{лент}}}{V}. \quad (28)$$

Для этого следует рассмотреть отношение выражения для мощности установки  $P$  по форму-

ле (12) к выражению для максимальной мощности водяного потока, имеющего вид:

$$\frac{m \cdot V^2}{2} = \frac{\rho \cdot S \cdot V^3}{2}; \quad (29)$$

$$C_p = \frac{C_D \frac{\rho(V \cdot \cos \beta - V_{\text{лент}})}{2} A \cdot \text{tg } \beta \cdot V_{\text{лент}}}{\frac{\rho \cdot S \cdot V^3}{2}}. \quad (30)$$

Учитывая, что  $A = S/\sin \beta$ , получается:

$$C_p = \frac{C_D \cdot (V \cdot \cos \beta - V_{\text{лент}})^2 \cdot V_{\text{лент}}}{V^3 \cdot \cos \beta} = \frac{C_D \left(1 - \frac{V_{\text{лент}}}{V \cdot \cos \beta}\right)^2 \cdot (V \cdot \cos \beta)^2 \cdot V_{\text{лент}}}{V^3 \cdot \cos \beta} = C_D \cdot \left(1 - \frac{Z}{\cos \beta}\right)^2 \cdot Z \cdot \cos \beta,$$

где  $Z = \frac{V_{\text{лент}}}{V}$  в соответствии с формулой (28).

Итак,

$$C_p = C_D \left(1 - \frac{Z}{\cos \beta}\right)^2 \cdot Z \cdot \cos \beta. \quad (31)$$

В соответствии с формулой (13) получается, что оптимальный режим реализуется при

$$V_{\text{лент}} = \frac{V \cdot \cos \beta}{3}.$$

Тогда

$$Z = \frac{V_{\text{лент}}}{V} = \frac{\cos \beta}{3}, \quad (32)$$

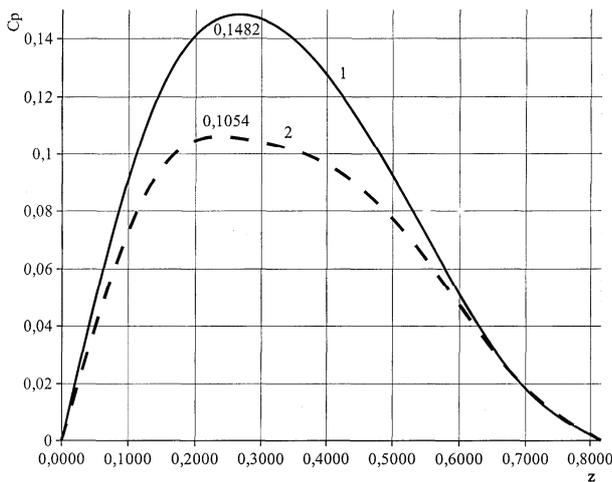
то есть, максимум  $C_p$  достигается при:

$$\frac{Z_{\text{opt.}}}{\cos \beta_{\text{opt.}}} = \frac{1}{3}. \quad (33)$$

Отсюда следует:

$$Z_{\text{opt.}} = \frac{\cos \beta_{\text{opt.}}}{3} = \frac{\sqrt{\frac{2}{3}}}{3} = 0,2722. \quad (34)$$

Это видно и на графике  $C_p(Z)$  (рис. 2) для  $C_D = 1,5$ .



1 —  $C_D=1,5$  (стандартные лопасти анемометра);  
2 —  $C_D=1,3$  (плоские лопасти).

**Рис. 2. Зависимости  $C_p(Z)$  для двух значений коэффициента сопротивления.**

**Выводы.** Из источников [1–8] следует, что принцип работы турбины во всех конструкциях практически идентичен: вода под напором поступает на лопасти турбины, которые начинают вращаться. Энергия вращения передается на электрогенератор, который отвечает за выработку электроэнергии. Турбины для объектов подбираются в соответствии с некоторыми техническими характеристиками, среди которых главной является напор воды.

Данная бесплотинная гидроустановка ленточного типа достигает максимума эффективности при низких величинах скорости. Оптималь-

ный угол наклона поверхности ленты к горизонту  $\beta$  составляет  $35^\circ 26'$ . Максимальный теоретический коэффициент мощности установки составляет 0,1482.

1. *Васько П.Ф., Вихорев Ю.О.* Мала гідроенергетика України: реалії сьогодення та аспекти подальшого розвитку // Відновлювана енергетика. – 2008. – № 2. – С. 62–65.
2. *Зведений прогноз науково-технологічного та інноваційного розвитку України на найближчі 5 років та на наступне століття.* – К.: Фенікс, 2007. – 152 с.
3. *Мак-Кормик М.* Преобразование энергии волн: Пер. с англ. / М. Мак-Кормик. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 186 с.
4. *Кривцов В.С.* Неисчерпаемая энергия. Кн. 3. Альтернативная энергетика: Учебник / В.С. Кривцов, А.М. Олейников, А.И. Яковлев – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т "Харьк. авиац. ин-т"; Севастополь: Нац. техн. ун-т, 2006. – 643 с.
5. *Сафонов В.А.* Использование энергии моря и Земли: Учеб. пособие / В.А. Сафонов, С.Б. Смирнов, В.В. Фиделис и др. – Севастополь: СИЯиП, 2004. – 232 с.
6. *Олейников А.М.* Конструкции электрогидрогенераторов для преобразования энергии текущей воды в электрическую / А.М. Олейников, Г.М. Федоренко, А.И. Яковлев // Материалы междунац. НТК "Проблемы повышения эффективности электромеханических преобразователей в энергетических системах". – Севастополь. – 2004. – С. 41–43.
7. *Васько П.Ф., Вихорев Ю.О.* Перспективи розвитку малої гідроенергетики України / Матеріали XX ювілейної міжнар. наук.-практ. конф. "Відновлювана енергетика XXI століття". – Крим, 2009. – С. 285–286.
8. *Яковлев А.И.* Энергия ветровых волн мирового океана и ее преобразование / А.И. Яковлев // Гідроенергетика України. – 2009. – №1. – С. 41–44.

**XII МІЖНАРОДНА СПЕЦІАЛІЗОВАНА ВИСТАВКА ЕНЕРГЕТИКА В ПРОМИСЛОВОСТІ-2014**

ЕНЕРГЕТИЧНЕ, ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНЕ ОБЛАДНАННЯ • ЕЛЕКТРОСТАТКУВАННЯ МЕХАНІЗМІВ, МАШИН • ПРОМИСЛОВИЙ ЕЛЕКТРОПРИВІД • СВІЛЛОТЕХНІКА  
ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ ДЛЯ ЕЛЕКТРОТРАНСПОРТУ • КАБЕЛЬНО-ПРОВІДНИКОВА ПРОДУКЦІЯ • АВТОМАТИЗАЦІЯ СИСТЕМ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ

**XII МІЖНАРОДНИЙ ФОРУМ ПАЛИВНО-ЕНЕРГЕТИЧНИЙ КОМПЛЕКС УКРАЇНИ: СЬОГОДЕННЯ ТА МАЙБУТНЄ**

МІЖНАРОДНИЙ ВИСТАВКОВИЙ ЦЕНТР  
Україна, 02660  
Київ, Броварський пр-т, 15  
М "Лівобережна"  
тел./факс: (044) 201-11-57  
e-mail: lyudmila@iec-expo.com.ua  
www.iec-expo.com.ua  
www.tech-expo.com.ua

ОРГАНІЗАТОРИ:  
Міністерство енергетики та вугільної промисловості України  
Міжнародний виставковий центр

Технічний партнер: *Розет*

**23-25  
вересня**