

УДК 66.015.23

Л. О. Шелудяков**А. Е. Сушко**, канд. техн. наукИнститут проблем машиностроения им. А. Н. Подгорного НАН Украины
(г. Харьков, E-mail: kravchenko@ipmach.kharkov.ua)**СИСТЕМАТИЗАЦИЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ
ПРОФИЛЕЙ ЛОПАСТЕЙ РАБОЧИХ КОЛЕС
ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ КАПСУЛЬНЫХ ГИДРОТУРБИН**

Исследованы статистические данные о геометрических параметрах профилей лопастей капсульных гидротурбин при напорах от 5 до 22 м. Получены зависимости параметров от напора. Результаты позволяют определять геометрические параметры лопастей на конкретно заданный напор на первом этапе проектирования лопасти.

Досліджено статистичні дані щодо геометричних параметрів профілів лопатей капсульних гідротурбін при напорах від 5 до 22 м. Отримано залежності параметрів від напору. Результати дозволяють визначати геометричні параметри лопатей на конкретно заданий напір на першому етапі проектування лопати.

Горизонтальные гидротурбины применяются сравнительно недавно, поэтому номенклатура их рабочих колес (РК) ограничена.

В работе [1] опубликованы некоторые экспериментальные исследования РК горизонтальных гидротурбин. Скелетные линии профилей лопастей РК – дуги окружностей. В работе [1] в качестве скелетных линий профилей лопастей ряда РК предполагаются квадратичные параболы, что с достаточной степенью достоверности подтверждается результатами сравнения форм скелетных линий с расчетными формами, полученными по уравнениям квадратичных парабол.

Для оценки зависимостей энергокавитационных качеств, приведенных оборотов РК, расхода воды горизонтальных гидротурбин от плотности периферийных решеток профилей лопастей и напора использованы универсальные характеристики моделей РК, исследованных на кавитационном стенде в проточной части горизонтальной гидротурбины. Геометрические параметры модели гидротурбины следующие: диаметр РК 250 мм; генераторная капсула диаметром $0,91D_1$ расположена со стороны напорной части; прямоосная коническая отсасывающая труба длиной $4,5D_1$; конический направляющий аппарат (НА) имеет 16 пространственных лопаток высотой $0,42D_1$, обеспечивающих полное его закрытие; камера РК полусферическая с диаметром горловины $0,973D_1$; втулки РК сферические с втулочным отношением $0,30/0,35$; количество лопастей 4. На другом энергокавитационном стенде исследованы РК диаметром $D_1 = 289$ мм с такими геометрическими параметрами проточной части: прямоосная отсасывающая труба имеет длину $4,5D_1$ с прямоугольным сечением на выходе размером $1,67D_1 \times 2D_1$; конический НА имеет 24 лопатки высотой $0,4D_1$, угол наклона которых с осью гидротурбины 65° ; статор имеет 8 колонн, установленных под углом к оси гидротурбины; камера РК полусферическая с диаметром горловины $0,973D_1$; втулки РК сферические с втулочным отношением $0,30/0,35$; количество лопастей 4. Некоторые РК имели 5 лопастей. В этой проточной части испытаны также РК, исследованные на стенде, указанном выше.

В табл. 1 приведены оптимальные обороты $n'_{\text{опт}}$ и расход воды $Q'_{\text{опт}}$, оптимальные углы установки лопастей, расчетные и оптимальные экспериментальные углы установки периферийных решеток профилей лопастей, а также оптимальные величины $\eta_{\text{опт}}$, $\sigma_{\text{опт}}$ РК

гидротурбин, испытанных на стендах, в зависимости от густоты периферийных решеток профилей \bar{b}_1 .

Таблица 1. Зависимость энергокавитационных качеств гидротурбин, оборотов РК и расхода воды от густоты периферийных решеток профилей

$H, \text{ м}$	\bar{b}_1	$n'_{\text{опт}}, \text{ об/мин}$	$Q'_{\text{опт}}, \text{ л/с}$	$\eta_{\text{м опт}}, \%$	$\sigma_{\text{м опт}}$	$\varphi_{\text{опт}}, \text{ град}$	$\beta_{e1}, \text{ град}$	$\beta_{e1} \text{ при } \varphi_{\text{опт}}$	$D_1, \text{ мм}$
10–12	0,600	175,0	1550	86,5	1,50	-0,9	13,9	13,0	250
10–12	0,622	174,0	1720	88,0	1,22	+3,2	13,9	17,1	289
		173,0	1680	88,5	1,30	+3,0		16,9	250
15	0,650	170,0	1510	89,0	0,87	+1,6	13,9	15,5	289
15–16,5	0,700	159,0	1490	89,5	0,85	+2,6	13,9	16,5	289
18	0,755	162,5	1585	89,0	0,81	-2,7	17,2	14,5	289
		158,0	1760	87,5	1,17	+1,9		19,1	250
18	0,755	157,0	1730	87,5	1,17	+0,9	17,2	18,1	250
20	0,778	149,0	1470	87,0	0,68	-1,2	13,9	12,7	289

По данным таблицы построены графические зависимости энергокавитационных качеств гидротурбин, оборотов РК и расхода воды от густоты периферийных решеток профилей (рис. 1).

Как видно из рисунка, оптимальный коэффициент кавитации $\sigma_{\text{опт}}$ гидротурбин с увеличением густоты периферийной решетки профилей уменьшается.

Оптимальный КПД гидротурбин с увеличением густоты периферийной решетки профилей до 0,725 увеличивается, а затем уменьшается. За базовые КПД, через которые проведена кривая зависимости $\eta_{\text{м опт}} = \varphi(\bar{b}_1)$, взяты КПД гидротурбины диаметром $D_1 = 289 \text{ мм}$. Различно повлияла на КПД форма проточной части гидротурбины. Этим подтверждается необходимость максимального согласования формы лопастей РК с формой проточной части гидротурбины, формирующей поток перед лопастями РК и реализующей его кинетическую энергию и энергию давления за лопастями на входе в отсасывающую трубу, а также в отсасывающей трубе.

На рисунке приведены две зависимости оптимального расхода от густоты периферийной решетки профилей. Наличие двух зависимостей расхода от густоты периферийной решетки профилей объясняется различными углами перекрутки лопастей. При одинаковой густоте периферийных решеток профилей больше расход у РК, угол перекрутки лопастей которых больше.

У вертикальных гидротурбин с увеличением перекрутки лопастей оптимум универсальной характеристики смещается в зону повышенных расходов, оптимальные обороты несколько уменьшаются, характеристики кавитационных и энергетических качеств в оптимуме ухудшаются.

Как видно из рассмотренных зависимостей

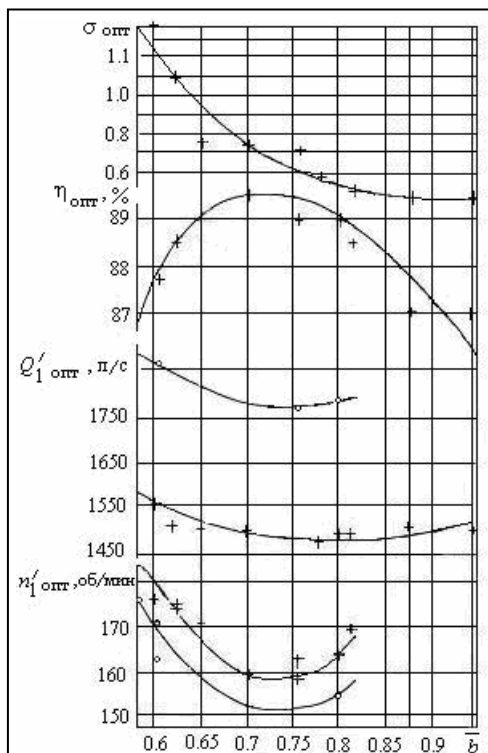


Рис. 1. Зависимость оптимальных коэффициентов кавитации, КПД, оборотов РК и расхода воды горизонтальных гидротурбин от густоты периферийных решеток профилей лопастей

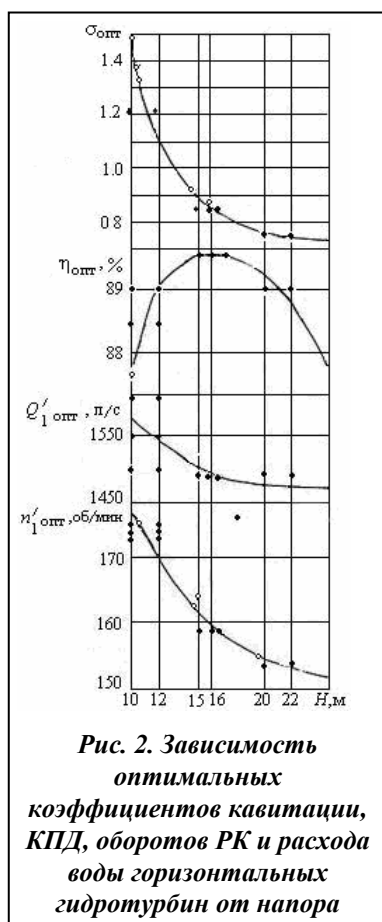


Рис. 2. Зависимость оптимальных коэффициентов кавитации, КПД, оборотов РК и расхода воды горизонтальных гидротурбин от напора

оптимальных коэффициентов кавитации, КПД, оборотов и расхода РК гидротурбин от напора получены на основании табл. 1.

Характер изменения оптимальных коэффициента кавитации, оборотов и расхода от напора горизонтальных и вертикальных гидро-

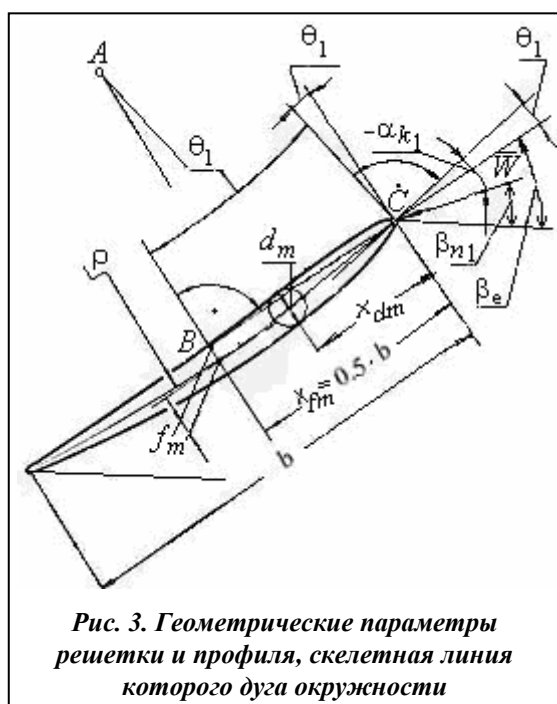


Рис. 3. Геометрические параметры решетки и профиля, скелетная линия которого дуга окружности

$\sigma_{топт}$, $\eta_{топт}$, Q'_{1opt} , указанной закономерности подчиняются и РК горизонтальных гидротурбин, перекрутка лопастей которых различна.

Обе зависимости расхода воды от густоты периферийной решетки профилей имеют одинаковую закономерность: с увеличением \bar{b}_1 до 0,745 оптимальный расход Q'_{1opt} уменьшается, с дальнейшим увеличением \bar{b}_1 до 0,800 оптимальный расход незначительно возрастает.

Имеем две зависимости оптимальных оборотов от густоты периферийной решетки профилей. Одна зависимость оборотов РК от густоты периферийных решеток профилей расположена ниже другой, т.е. при одинаковой густоте периферийной решетки профилей оптимальные обороты, полученные по этой зависимости, меньше, чем по первой. Объясняется это большими углами перекрутки лопастей РК.

Как видно из рис. 1, в интервале густоты периферийной решетки профилей от 0,70 до 0,75 имеем максимальную величину КПД, равную 89,5%. Оптимальный коэффициент кавитации при этом 0,70, оптимальный расход и обороты в указанном диапазоне изменения густоты периферийной решетки профилей практически постоянны и минимальны.

Следует отметить, что такой характер изменения n'_{1opt} , $\eta_{топт}$, Q'_{1opt} в зависимости от густоты периферийной решетки профилей с явно выраженными зонами максимума и минимума их функций отличается от аналогичных зависимостей для вертикальных гидротурбин [2].

Представленные на рис. 2 графики зависимостей оптимальных коэффициентов кавитации, КПД, оборотов и расхода РК гидротурбин от напора

аналогичен. Исключение составляет характер изменения оптимального КПД РК гидротурбины от напора. У зависимости $\eta_{топт} = f(H)$ имеются максимальные величины в диапазоне напоров от 15 до 18 м, в то время как у РК вертикальной гидротурбины с увеличением напора КПД уменьшается.

Как видно из рис. 1, максимальному КПД соответствует густота периферийной решетки профилей от 0,70 до 0,75, а на рис. 2 – напор от 15 до 18 м.

Рассмотрим графические зависимости геометрических параметров профилей и решеток от напора, пользуясь обозначениями рис. 3, где приняты следующие обозначения: b – хорда профиля; θ_1 – угол между хордой профиля и касательной к скелетной линии в точке входа C ; d_m – максимальная толщина профиля; x_{dm} – координата максимальной толщины профиля; f_m – максимальный прогиб профиля; x_{fm} – коор-

дината максимального прогиба профиля; ρ – радиус кривизны скелетной линии; \bar{W} – скорость натекания потока; β_e – угол установки профиля; β_{n1} – угол натекания потока; $-\alpha_{k1}$ – отрицательный угол атаки между β_{n1} и \bar{W} .

В табл. 2 приведены численные зависимости густоты решеток профилей лопастей РК гидротурбин от напора H для различных расчетных диаметров $\bar{d}^{(i)}$ цилиндрических сечений при расчетном угле установки, который, как правило, больше или меньше оптимального (корректировка густоты решеток профилей в связи с различными величинами расчетного и оптимального углов установки лопастей не проводилась).

Для расчета густоты решеток профилей в цилиндрических сечениях лопастей при заданном напоре графические зависимости $\bar{b}^{(i)} = f(H)$ при $\bar{d} = \text{const}$ ($d^{(i)}$ – диаметр, в метрах) приведены в табл. 2.

Зависимости $\bar{b}^{(i)} = f(H)$ при $\bar{d}^{(i)} = \text{const}$ получены из графических зависимостей $\bar{b}^{(i)} = \varphi(\bar{d}^{(i)})$ при $H = \text{const}$ рассматриваемых РК.

Таблица 2. Зависимость густоты решеток профилей лопастей РК гидротурбин от напора для различных расчетных диаметров

$H, \text{ м}$	$b^{(i)}$						
	$d^{(i)} = 0,978$	$d^{(i)} = 0,870$	$d^{(i)} = 0,761$	$d^{(i)} = 0,652$	$d^{(i)} = 0,543$	$d^{(i)} = 0,435$	$d^{(i)} = 0,326$
5,0	0,584	0,635	0,679	0,739	0,817	0,915	1,023
7,5	0,607	0,638	0,693	0,752	0,831	0,928	1,036
10,0	0,621	0,662	0,707	0,766	0,845	0,942	1,049
12,0	0,626	0,673	0,718	0,777	0,856	0,954	1,070
15,0	0,651	0,691	0,738	0,803	0,890	1,002	1,131
17,5	0,716	0,760	0,816	0,891	0,986	1,117	1,247
20,0	0,771	0,825	0,891	0,981	1,093	1,243	1,398
22,0	0,825	0,879	0,958	1,061	1,192	1,365	1,539

Оптимальные углы установки профилей периферийных решеток лопастей $\beta_e^{(1)}$ получены на основании расчетных (при расчетном угле установки лопасти) и оптимальных углов установки лопастей РК гидротурбин на различные напоры, как $\beta_e^{(1)} = \beta_{e \text{ расч.}}^{(1)} + \varphi_{\text{опт}}$. При этом принимаем, что при развороте лопастей на $\varphi_{\text{опт}}$ расчетный угол установки профиля в i -м сечении лопасти остается постоянным, а новое значение угла $\beta_e^{(i)} = \beta_{e \text{ расч.}}^{(i)} + \varphi_{\text{опт}}$. Это допущение приближенно, так как при развороте лопасти в i -е цилиндрическое сечение попадает близлежащая слева и справа от i -го расчетного сечения часть лопасти и первоначальное расчетное значение $\beta_{e \text{ расч.}}^{(i)}$ изменяется, т.е. его значение зависит от $\varphi_{\text{опт}}$, а поэтому $\beta_e^{(i)} \neq \beta_{e \text{ расч.}}^{(i)} + \varphi_{\text{опт}}$. При значениях $\varphi_{\text{опт}} = \pm 1^\circ$ можно принять, что $\beta_{e \text{ расч.}}^{(i)}$ остается практически постоянным.

Оптимальные углы установки профилей периферийных решеток лопастей аппроксимированы уравнением прямой

$$\beta_{e \text{ опт}}^{(1)} = (310,56 - 1,66 \cdot H) / 17.$$

Изменение угла перекрутки внутренней хорды профилей цилиндрических сечений лопастей РК гидротурбин при различных напорах представлено ниже.

$\Delta\beta_e^{(i)}$	23,1	17,6	12,2	7,57	4,18	1,69	0
$\bar{d}^{(i)}$	0,326	0,435	0,543	0,652	0,761	0,870	0,978

Угол перекрутки внутренней хорды профиля в i -м цилиндрическом сечении принимается относительно углового положения внутренней хорды профиля в периферийном цилиндрическом сечении. Аппроксимируемая кривая $\Delta\beta_e^{(i)} = f(\bar{d}^{(i)})$ проведена через $\Delta\beta_e^{(i)}$ лопастей, принятых за базовые. Кривая изменения $\Delta\beta_e^{(i)} = f(\bar{d}^{(i)})$ не зависит от напора горизонтальных гидротурбин. Зона разброса $\Delta\beta_e^{(i)} = f(\bar{d}^{(i)})$ обусловлена различным характером изменения $\Delta\beta_e^{(i)} = f(\bar{d}^{(i)})$ профилей лопастей РК, даже рекомендуемых на одинаковые напоры. Какой-либо закономерности изменения $\Delta\beta_e^{(i)}$ от напора при $\bar{d} = \text{const}$ не имеется. Величина разброса $\Delta\beta_e^{(i)}$ лопастей РК горизонтальной гидротурбины значительно больше, чем у лопастей РК вертикальных гидротурбин. Объяснить это можно тем, что номенклатура РК вертикальных гидротурбин включает в себя большее количество тщательно отработанных относительно энергокавитационных качеств РК, чем номенклатура РК горизонтальных гидротурбин.

Имея оптимальный угол установки профиля в решетке периферийного цилиндрического сечения лопасти и угол перекрутки внутренней хорды профиля в i -м цилиндрическом сечении, можно определить в этом сечении оптимальный угол установки профиля

$$\beta_e^{(i)} = \Delta\beta_e^{(i)} + \beta_e^{(1)}.$$

Для профиля, скелетная линия которого – дуга окружности, угол между касательной к скелетной линии профиля в теоретической точке входа потока и внутренней хордой можно установить по формуле

$$\theta_1 = \text{arctg}(\bar{f}_m / (0,25 - \bar{f}_m^2)).$$

Зависимость $\theta_1^{(1)}$ профиля периферийного цилиндрического сечения от напора гидротурбин аппроксимирована уравнением прямой $\theta_1^{(1)} = (0,04 \cdot H + 39,12)/9$. Выявить однозначно зависимость $\theta_1^{(1)} = f(H)$ не представляется возможным. Она предположительно наиболее полно соответствует закономерности изменения $\theta_1^{(1)}$ профилей лопастей имеющихся гидротурбин.

Угол между внутренней хордой профиля и касательной к скелетной линии в теоретической точке выхода потока θ_2 равен θ_1 , если скелетная линия – дуга окружности. Графические зависимости $\theta_1^{(i)} = f(\bar{d}^{(i)})$ не зависят от напора горизонтальных осевых гидротурбин.

Перекрутка касательных к скелетной линии двух профилей в теоретических точках входа потока относительно внутренней хорды не зависит от напора горизонтальных осевых гидротурбин. Зона разброса значений $\Delta\theta_1^{(i)} = f(\bar{d})$ обусловлена различным первоначальным характером изменения $\Delta\theta_1^{(i)} = f(\bar{d})$ профилей лопастей РК различных марок, даже предназначенных на одинаковые напоры. Какой-либо закономерности изменения $\Delta\theta_1^{(i)}$ от напора при $\bar{d} = \text{const}$ не имеется.

Не зависит от напора и перекрутка касательных к скелетной линии профилей в теоретических точках входа потока относительно фронта решеток профилей, поскольку ни $\Delta\beta_e^{(i)}$, ни $\Delta\theta_1^{(i)}$ не зависят от напора. Некоторый разброс $\Delta(\beta_e^{(i)} + \theta_1^{(i)})$ обусловлен разбросом $\Delta\beta_e^{(i)}$ и $\Delta\theta_1^{(i)}$.

Зависимость $\Delta^0(\beta_e^{(i)} + \theta_1^{(i)})$ от диаметра сечения представлена ниже.

$\Delta\beta_e^{(i)}$	34,38	24,68	16,02	9,87	5,39	2,13	0
$\bar{d}^{(i)}$	0,326	0,435	0,543	0,652	0,761	0,870	0,978

Определив величину $\Delta\beta_e^{(i)}$ и $\Delta(\beta_e^{(i)} + \theta_1^{(i)})$ для любого цилиндрического сечения лопасти, можно вычислить $\Delta\theta_1^{(i)}$

$$\Delta\theta_1^{(i)} = \Delta(\beta_e^{(i)} + \theta_1^{(i)}) - \Delta\beta_e^{(i)}.$$

Определив $\theta_1^{(1)}$ для периферийного сечения лопасти, вычисляем $\theta_1^{(i)}$ рассматриваемого сечения лопасти

$$\theta_1^{(i)} = \Delta\theta_1^{(i)} + \theta_1^{(1)}.$$

Затем находим относительный максимальный прогиб профиля решетки лопастей РК, скелетная линия которого дуга окружности

$$\bar{f}_m^{(i)} = 0,5 \cdot \sqrt{\text{ctg}^2\theta_1^{(i)} + 1} - \text{ctg}\theta_1^{(i)}.$$

Графики зависимостей $\bar{d}_m = f(H)$ при $\bar{d} = \text{const}$ получены из графиков зависимостей $\bar{d}_m = f(\bar{d})$ при $H = \text{const}$. При построении графиков $\bar{d}_m = f(H)$ при $\bar{d} = \text{const}$ последние корректировались из условия возможности их аппроксимации кубическими сплайн-функциями. Скорректированные из этих условий графики зависимостей $\bar{d}_m = \varphi(\bar{d})$ при $H = \text{const}$ располагаются один под другим.

Максимальная относительная толщина профилей в цилиндрических сечениях лопастей РК гидротурбины с увеличением напора возрастает, чего нельзя сказать о зависимостях $\bar{d}_m = f(\bar{d})$ лопастей рассматриваемых РК, которые рекомендованы на одинаковые напоры, но имеют разные $\bar{d}_m = f(\bar{d})$.

Зависимость $\bar{d}_m = \varphi(\bar{d})$ при $H = \text{const}$ даны в табл. 3 для профилей лопастей, у которых относительная максимальная толщина расположена на расстоянии 0,35 длины внутренней хорды от теоретической точки входа потока.

Относительный радиус закругления R/d_m входных кромок профилей в решетках расчетных цилиндрических сечений лопастей рекомендуется принимать одинаковым, равным 0,18 – 0,20.

Радиус закругления выходных кромок профилей в решетках расчетных цилиндрических сечений лопастей для РК диаметром 1 м рекомендуется определять по формуле $r = 0,01 \cdot (0,00125 \cdot H + 0,0625)$.

Таблица 3. Изменение толщины профиля лопасти от относительного диаметра сечения при различных напорах

H, м	$d_m^{(i)}$						
	$d^{(i)} = 0,978$	$d^{(i)} = 0,870$	$d^{(i)} = 0,761$	$d^{(i)} = 0,652$	$d^{(i)} = 0,543$	$d^{(i)} = 0,435$	$d^{(i)} = 0,326$
5,0	2,0	2,68	3,40	4,33	5,89	8,38	11,26
7,5	2,02	2,72	3,44	4,43	6,00	8,53	11,43
10,0	2,06	2,74	3,50	4,55	6,22	8,82	11,82
12,5	2,08	2,78	3,60	4,78	6,53	9,20	12,26
15,0	2,12	2,84	3,74	5,10	6,91	9,58	12,65
17,5	2,16	2,88	3,90	5,35	7,23	9,87	12,97
20,0	2,20	2,95	4,01	5,49	7,45	10,06	13,26
22,0	2,24	2,29	4,07	5,56	7,57	10,18	13,46

Определяем радиус дуги окружности скелетной линии профиля в i -м цилиндрическом сечении лопасти $\rho^{(i)} = 0,5 \cdot b^{(i)} / \sin \theta_1^{(i)}$.

Количество лопастей РК горизонтальных осевых гидротурбин на напоры $5 \leq H \leq 16,5$ равно 4, а для $16,5 \leq H \leq 22,0$ $Z_{РК} = 5$.

Рекомендации, полученные на основании систематизации геометрических параметров профилей и решеток лопастей РК горизонтальных осевых гидротурбин на напоры от 5 до 22 м, не являются бесспорными, так как в диапазоне от 5 до 10 м нет РК с лопастями, профили которых имеют скелетную линию в виде дуги окружности.

Литература

1. *Свинарев Г. А.* Горизонтальные капсульные гидротурбины осевого типа / Г. А. Свинарев, А. А. Меловцов. – Киев: Наук. думка, 1969. – 198 с.
2. *Шелудяков Л. О.* Систематизация геометрических параметров профилей и решеток лопастей рабочих колес вертикально осевых гидротурбин / Л. О. Шелудяков, А. Е. Сушко // Пробл. машиностроения. – 2007. – **10**, № 5. – С. 11–18.

Поступила в редакцию
31.08.09