

**М. Б. МАРАХОВСКИЙ, А. И. ГАСЮК, О. Б. ПАНАМАРЕВА, А. А. ЯРОШЕНКО**

### **ЗАВИСИМОСТЬ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕОРЕТИЧЕСКОГО НАПОРА ВЫСОКОНАПОРНОЙ РАДИАЛЬНО-ОСЕВОЙ ТУРБИНЫ ОТ РЕЖИМНЫХ ПАРАМЕТРОВ**

Взаимодействие потока жидкости с рабочим колесом характеризуется следующими интегральными параметрами: гидравлическим моментом на рабочем колесе, гидравлической мощностью и теоретическим напором. В работе с помощью методов теории размерностей осуществлен переход от размерных зависимостей к безразмерным соотношениям для соответствующих коэффициентов. В соответствии с опытными данными безразмерная циркуляция перед рабочим колесом для данной линии тока зависит только от угла потока за решеткой направляющего аппарата, т. е. от открытия направляющего аппарата. Из полученных зависимостей вытекает выражение для коэффициента теоретического напора от режимных параметров. В безразмерной форме полученные зависимости коэффициента теоретического напора от обобщенного безразмерного кинематического параметра  $K_Q$  наиболее удобны для анализа энергетических характеристик рассматриваемой проточной части радиально-осевой гидротурбины. Кроме того, получено уравнение моментной характеристики гидротурбины также в безразмерной форме. Рассчитанные теоретические зависимости сравнены с экспериментальными данными для различных типов рабочих колес. Полученные результаты позволяют судить о возможности использования разработанных моделей для исследования энергетических качеств высоконапорных радиально-осевых турбин. Рассмотренные кинематические модели могут быть положены в основу упрощенных моделей рабочего процесса, используемых на начальных стадиях проектирования проточной части. Полученные зависимости построены исходя из решения осесимметричной задачи течения жидкости в проточной части. Из предварительного решения этой задачи для получения безразмерных энергетических характеристик используются коэффициенты  $A$  и  $B$ , учитывающие изменение меридианной скорости течения жидкости в характерных сечениях проточной части и учитывающие изменение картины течения в зависимости от режимных параметров. Найдена зависимость коэффициентов циркуляции и коэффициента теоретического напора пространственной решетки рабочего колеса от геометрических и режимных параметров. Эта зависимость может быть использована для поверочных расчетов (распределения меридиональных и окружных составляющих скорости, циркуляции) при проведении многовариантных расчетов в САПР.

**Ключевые слова:** коэффициент напора, проточная часть, режимные параметры гидротурбины, математическая модель, гидродинамические характеристики, радиально-осевая гидротурбина, коэффициент момента, осесимметричная задача.

**М. Б. МАРАХОВСЬКИЙ, О. І. ГАСЮК, О. Б. ПАНАМАРЬОВА, О. А. ЯРОШЕНКО**

### **ЗАЛЕЖНІСТЬ КОЕФІЦІЕНТУ ТЕОРЕТИЧНОГО НАПОРУ ВИСОКОНАПІРНОЇ РАДІАЛЬНО-ОСЬОВОЇ ТУРБИНИ ВІД РЕЖИМНИХ ПАРАМЕТРІВ**

Взаємодія потоку рідини з робочим колесом характеризується наступними інтегральними параметрами: гідравлічним моментом на робочому колесі, гідравлічною потужністю і теоретичним напором. В роботі за допомогою методів теорії розмірностей здійснений перехід від розмірних залежностей до безрозмірних співвідношень для відповідних коефіцієнтів. Відповідно до експериментальних даних безрозмірна циркуляція перед робочим колесом для даної лінії струму залежить тільки від кута потоку за решіткою направляючого апарату тобто від відкриття направляючого апарату. З отриманих залежностей випливає вираз для коефіцієнта теоретичного напору від режимних параметрів. У безрозмірній формі отримана залежність коефіцієнта теоретичного напору від узагальненого безрозмірного кінематичного параметра  $K_Q$  найбільш зручна для аналізу енергетичних характеристик розглянутої проточної частини радіально-осьової гідротурбіни. Крім того, отримано рівняння моментної характеристики гідротурбіни також в безрозмірній формі. Розраховані теоретичні залежності порівняні з експериментальними даними для різних типів робочих коліс. Отримані результати дозволяють судити про можливість використання розроблених моделей для дослідження енергетичних якостей високонапірних радіально-осьових турбін. Розглянуті кінематичні моделі можуть бути покладені в основу спрощених моделей робочого процесу, що використовуються на початкових стадіях проектування проточної частини. Отримані залежності побудовані виходячи з рішення осьосиметричної задачі течії рідини в проточній частині. З попереднього рішення цього завдання для отримання безрозмірних енергетичних характеристик використовуються коефіцієнти  $A$  і  $B$ , що враховують зміну меридіанної швидкості течії рідини в характерних перетинах проточної частини і враховують зміну картини течії в залежності від режимних параметрів. Знайдена залежність коефіцієнтів циркуляції і коефіцієнта теоретичного напору просторової решітки робочого колеса від геометричних і режимних параметрів. Ця залежність може бути використана для перевірочних розрахунків (розподілу меридіональних і окружних складових швидкості, циркуляції) при проведенні різноманітних розрахунків в САПР.

**Ключові слова:** коефіцієнт напору, проточна частина, режимні параметри гідротурбіни, математична модель, гідродинамічні характеристики, радіально-осьова гідротурбіна, коефіцієнт моменту, осьосиметрична задача.

**M. MARAKHOVSKY, A. GASIUK, O. PANAMARIOVA, A. YAROSHENKO**

### **DEPENDENCE OF THE THEORETICAL PRESSURE OF THE HIGHLY-PRESSURE RADIAL-AXIAL TURBINE THEORETICAL AGAINST THE MODE PARAMETERS**

The interaction of fluid flow with the impeller is characterized by the following integral parameters: hydraulic torque at the impeller, hydraulic power and theoretical head. In the work, using the methods of the theory of dimensions, a transition was made from dimensional dependencies to dimensionless relations for the corresponding coefficients. In accordance with the experimental data, the dimensionless circulation in front of the impeller for a given current line depends only on the angle of flow behind the grating of the guide vane, from opening guide vanes. From the dependencies obtained, the expression for the coefficient of theoretical pressure on operating parameters follows. In the dimensionless form, the obtained dependence of the theoretical head coefficient on the generalized dimensionless kinematic parameter  $K_Q$  is most convenient for analyzing the energy characteristics of the considered flow part of the radial-axial hydraulic turbine. In addition, the equation obtained for the moment characteristic of the turbine is also in a dimensionless form. The calculated theoretical dependences are compared with experimental data for various types of impellers. The results obtained make it possible to judge the possibility of using the developed models for the study of the energy qualities of high-pressure radial-axial turbines. The considered kinematic models can be used as the basis for simplified workflow models used in the initial stages of the design of the flow part. The dependences obtained are based on the solution of the axisymmetric problem of fluid flow in the flow part. From the preliminary solution of this problem, to obtain dimensionless energy characteristics, the coefficients  $A$  and  $B$  are used, taking into account the change in the meridian velocity of the fluid flow in the characteristic sections of the flow part and taking into account the change in the flow pattern depending

on the operating parameters. The dependence of the circulation coefficients and the theoretical head of the spatial grid of the impeller on the geometric and operating parameters are found. This dependence can be used for calibration calculations (distribution of meridional and circumferential components of velocity, circulation) during multivariate calculations in CAD.

**Key words:** head coefficient, flow part, regime parameters of a hydro turbine, mathematical model, hydrodynamic characteristics, radial-axial hydro turbine, moment coefficient, axisymmetric problem.

**Введение.** Взаимодействие потока жидкости с рабочим колесом характеризуется следующими интегральными параметрами:

- гидравлическим моментом на рабочем колесе [1–4]:

$$M_{\Gamma} = \frac{\rho Q}{2\pi} (\bar{\Gamma}_1 - \bar{\Gamma}_2); \quad (1)$$

- гидравлической мощностью:

$$N_{\Gamma} = M_{\Gamma} \omega; \quad (2)$$

- теоретическим напором:

$$H_T = \frac{N_{\Gamma}}{\gamma Q} = \frac{M_{\Gamma} \omega}{\gamma Q}. \quad (3)$$

С помощью методов теории размерностей можно перейти от размерных зависимостей к безразмерным соотношениям для соответствующих коэффициентов более удобным для анализа гидродинамических качеств высоконапорных радиально-осевых гидротурбин.

**Основная часть.** Под безразмерными теоретическими характеристиками понимается зависимость коэффициента момента, коэффициента гидравлической мощности и коэффициента теоретического напора от безразмерных комплексов, характеризующих, соответственно, направление потока перед рабочим колесом и режим работы гидротурбины [5–8]:

$$K_{M\Gamma} = \frac{M_{\Gamma} D}{\rho Q^2} = f_1 \left( \frac{\bar{\Gamma}_1 D}{Q}; K_Q \right) = \frac{1}{2\pi} \left( \frac{\bar{\Gamma}_1 D}{Q} - \frac{\bar{\Gamma}_2 D}{Q} \right); \quad (4)$$

$$K_{N\Gamma} = \frac{N_{\Gamma} D^4}{\rho Q^3} = f_2 \left( \frac{\bar{\Gamma}_1 D}{Q}; K_Q \right) = \frac{K_Q}{2\pi} \left( \frac{\bar{\Gamma}_1 D}{Q} - \frac{\bar{\Gamma}_2 D}{Q} \right); \quad (5)$$

$$K_{HT} = \frac{g H_T D^4}{Q^2} = f_3 \left( \frac{\bar{\Gamma}_1 D}{Q}; K_Q \right) = \frac{K_Q}{2\pi} \left( \frac{\bar{\Gamma}_1 D}{Q} - \frac{\bar{\Gamma}_2 D}{Q} \right). \quad (6)$$

Циркуляция на поверхности тока за рабочим колесом равна:

$$\Gamma_2 = 2\pi r_2 C_{2u}. \quad (7)$$

Выразив значение  $C_{2u}$  и  $C_{2m}$  через режимные параметры получим:

$$C_{2u} = \omega r_2 - C_{2m} \operatorname{ctg} \beta_2; \quad (8)$$

$$\Gamma_2 = 2\pi (r_2^2 - A_2 r_2 \operatorname{ctg} \beta_2) \omega + 2\pi r_2 \operatorname{ctg} \beta_2 B_2 Q. \quad (9)$$

Выражение для безразмерного комплекса циркуляции будет иметь вид [9–11]:

$$\frac{\bar{\Gamma}_2 D}{Q} = \frac{2\pi}{D^2} (r_2^2 - A_2 r_2 \operatorname{ctg} \beta_2) K_Q + 2\pi r_2 \operatorname{ctg} \beta_2 B_2 D. \quad (10)$$

В соответствии с опытными данными безразмерная циркуляция перед рабочим колесом для данной линии тока зависит только от открытия направляющего аппарата [12–15]:

$$\frac{\bar{\Gamma}_1 D}{Q} = f(a_0, \psi). \quad (11)$$

Величина теоретического напора на данной линии тока может быть записана в виде:

$$H_T(\psi) = \frac{(\Gamma_1 - \Gamma_2) \omega}{2\pi g}; \quad (12)$$

$$H_T(\psi) = \left[ \left( \frac{\Gamma_1(a_0, \psi)^*}{D} - 2\pi r_2 \operatorname{ctg} \beta_2^* B_2 \right) Q \right] \frac{\omega}{2\pi g} - \left[ -2\pi (r_2^2 - A_2 r_2 \operatorname{ctg} \beta_2) \omega \right]. \quad (13)$$

Из последней формулы вытекает зависимость коэффициента теоретического напора от режимных параметров. Укажем безразмерную форму зависимости коэффициента теоретического напора от обобщенного безразмерного кинематического параметра [16–20]:

$$K_{HT} = \frac{g H_T D^4}{Q^2}; \quad (14)$$

$$K_{HT}(\psi) = \frac{K_Q}{2\pi} \left\{ \Gamma_1(a_0, \psi) - 2\pi r_2 \operatorname{ctg} \beta_2 B_2 \right\} - \left\{ -\frac{2\pi}{D} (r_2^2 - A_2 r_2 \operatorname{ctg} \beta_2) K_Q \right\} \frac{K_Q}{2\pi}. \quad (15)$$

Зависимость осредненной циркуляции потока за рабочим колесом от режимных параметров находится

при помощи осреднения циркуляций на входе и выходе из колеса по расходу:

$$\bar{\Gamma}_2 = \frac{1}{Q} \int \Gamma_2 dQ; \quad (16)$$

$$\bar{\Gamma}_2 = \frac{\omega}{Q} \int [2\pi r_2^2 + 2\pi r_2 A(l)] dQ - \int [2\pi r_2 B(l) \text{ctg} \beta_2^*] dQ; \quad (17)$$

$$dQ = 2\pi r (A\omega - BQ) \cos \delta dl. \quad (18)$$

После подстановки (18) в (17) и преобразования выражения получим:

$$\bar{\Gamma}_2 = 4\pi^2 \left[ \int (r_2^3 B(l) + r_2^2 B(l) A(l) + r_2^2 B(l) A(l) \text{ctg} \beta_2^*) \times \cos \delta dl \right] \omega - 4\pi^2 \left[ \int r_2^2 B^2(l) \text{ctg} \beta_2^* \cos \delta dl \right] Q - 4\pi^2 \left[ \int (r_2^3 A(l) + r_2^2 A^2(l)) \cos \delta dl \right] \frac{\omega^2}{Q}. \quad (19)$$

В приведенных величинах безразмерный комплекс циркуляции на выходе из рабочего колеса равен [21]:

$$\frac{\Gamma_2 D}{Q} = F_1 K_Q - F_0 - F_2 K_Q^2, \quad (20)$$

где:

$$F_0 = 4\pi^2 \left[ \int r_2'^2 B'^2(l) \text{ctg} \beta_2^* \cos \delta dl' \right]; \quad (21)$$

$$F_1 = 4\pi^2 \left[ \left( \int r_2' - 2A'(l) \text{ctg} \beta_2^* \right) r_2'^2 B'(l) \cos \delta dl' \right]; \quad (22)$$

$$F_2 = 4\pi^2 \left[ \left( \int r_2'^2 - A'(l) \text{ctg} \beta_2^* \right) \cos \delta dl' \right]. \quad (23)$$

Подставив (20) в уравнение (6), получим уравнение безразмерной напорной характеристики рабочего колеса:

$$K_{HT} = \frac{1}{2\pi} \left[ \frac{\bar{\Gamma}_2 D}{Q} - F_1 K_Q + F_0 + F_2 K_Q^2 \right] K_Q. \quad (24)$$

Из анализа уравнений (5), (6) следует, что выражения для коэффициентов теоретического напора и мощности совпадают.

На рис. 1 и рис. 2 приведены теоретические и экспериментальные зависимости  $K_{HT} = f\left(\frac{\bar{\Gamma}_1 D}{Q}, K_Q\right)$  для различных типов рабочих колес.

**Выводы:** 1. Найдена зависимость коэффициентов циркуляции и коэффициента

теоретического напора пространственной решетки рабочего колеса от геометрических и режимных параметров.

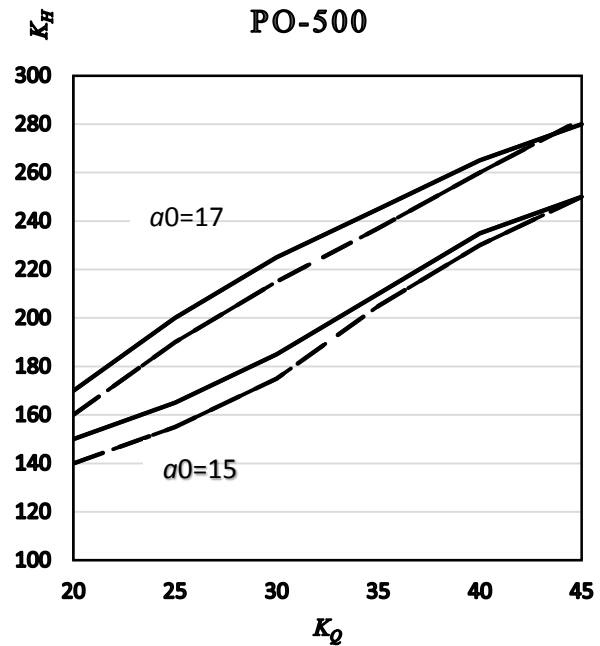


Рис. 1. Сравнение расчетных и экспериментальных данных величин коэффициента теоретического напора в проточной части высоконапорной гидротурбины PO-500: — расчет; - - - эксперимент

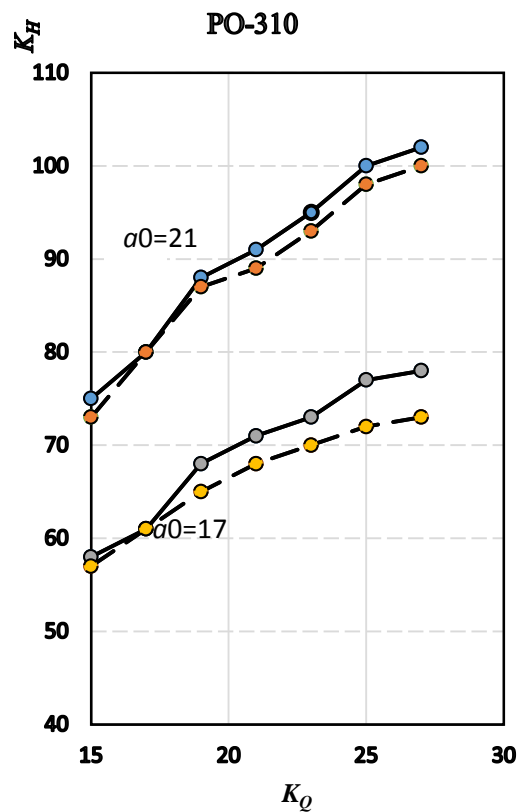


Рис. 2. Сравнение расчетных и экспериментальных данных величин коэффициента теоретического напора в проточной части высоконапорной гидротурбины PO-310: — расчет; - - - эксперимент

Эта зависимость может быть использована для поверочных расчетов (распределения меридиональных и окружных составляющих скорости, циркуляции) при проведении многовариантных расчетов в САПР.

2. Форма представления модели удобна, как для проведения численного исследования влияния геометрических параметров проточной части, так и проведения оптимизационных расчетов.

#### Список литературы

1. Мараховский М. Б., Гасюк А. И. Математическая модель гидродинамических характеристик элементов проточной части радиально-осевой гидротурбины. Часть 1. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Hydraulic machines and hydraulic units.* Kharkiv: NTU "KhPI". 2018. No. 42 (948). P. 17–22.
2. Колычев В. А., Дранковский В. Э., Мараховский М. Б. *Расчет гидродинамических характеристик направляющих аппаратов гидротурбин: учебн. пособ.* Харьков: НТУ «ХПИ», 2002. 216 с.
3. Колычев В. А. *Кинематические характеристики потока в лопастных гидромашинках: учебн. пособ.* Ленинград: ИСМО, 1995.
4. Колычев В. А., Тынъянова И. И. Приближенный метод расчета кинематических параметров потока в проточной части радиально-осевой гидротурбины. *Вісник Нац. техн. ун-та «ХПІ».* Сер.: *Енергетичні і теплотехнічні процеси і устаткування.* Харків: НТУ «ХПІ». 2014. № 1. С. 58–68.
5. Потетенко О. В., Шевченко Н. Г., Радченко Л. Р., Ковалев С. М., Дяченко К. С. Анализ вихревой структуры потока в каналах радиально-осевой гидротурбины на напоры 400–500 м. *Вестник Нац. техн. ун-та «ХПИ»: сб. науч. тр. Темат. вып.: Энергетические и теплотехнические процессы и оборудование.* Харьков: НТУ «ХПИ». 2004. № 12. С. 45–55.
6. Потетенко О. В., Шевченко Н. Г., Радченко Л. Р., Ковалев С. М., Подвойский Ю. А. Основные параметры и закономерности структуры потока в высоконапорных гидротурбинах РО 400–500. *Вестник Нац. техн. ун-та «ХПИ»: сб. науч. тр.* Харьков: НТУ «ХПИ». 2004. № 11. С. 68–75.
7. Миронов К. А., Барлит В. В., Рао С., Харвани Л. К. Улучшение энергетических показателей рабочих колес гидротурбины РО500 при помощи численного моделирования течения в проточной части. *Вісник Нац. техн. ун-ту «ХПІ».* Харків: НТУ «ХПІ». 2004. № 12. С. 41–48.
8. Миронов К. А. Проектирование рабочих колес радиально-осевой высоконапорной гидротурбины на параметры ГЭС Каменг. *Вестник Нац. техн. ун-та «ХПИ»: сб. науч. тр. Темат. вып.: Технологии в машиностроении.* Харьков: НТУ «ХПИ». 2010. № 24. С. 69–76.
9. Миронов К. А. Разработка радиально-осевых рабочих колес с высокими энергетическими показателями. *Науковий вісник будівництва.* Харків: ХДТУБА, ХОТВ АБУ. 2011. № 66. С. 411–415.
10. Колычев В. А., Тынъянова И. И., Миронов К. А. Применение безразмерных параметров для анализа рабочего процесса гидротурбин. *Вісник Нац. техн. ун-ту «ХПІ».* Харків: НТУ «ХПІ». 2005. № 28. С. 79–88.
11. Колычев В. А., Тынъянова И. И., Миронов К. А. Применение безразмерных параметров для анализа энергетических характеристик радиально-осевых гидротурбин. *Восточно-европейский журнал передовых технологий.* 2008. Т. 4, № 5. С. 49–57.
12. Колычев В. А., Миронов К. А., Тынъянова И. И., Цехмистро Л. Н., Дранковский В. Э., Сергеев А. В. Расчет и анализ баланса потерь энергии в высоконапорной радиально-осевой гидравлической турбине. *Східно-Європейський журнал передових технологій.* 2005. № 1/2 (13). С. 95–106.
13. Колычев В. А., Миронов К. А., Тынъянова И. И. Моделирование энергетических характеристик гидротурбин на начальном этапе проектирования. *Східно-Європейський журнал передових технологій.* 2010. № 6 (43). С. 27–37.
14. Колычев В. А., Миронов К. А., Тынъянова И. И. Согласование элементов проточной части при проектировании радиально-осевых гидротурбин. *Проблемы машиностроения.* 2009. Т. 12, № 5. С. 3–8.
15. Колычев В. А., Миронов К. А., Тынъянова И. И. Общие закономерности рабочего процесса и их применение для расчета и анализа энергетических характеристик гидротурбин. *Восточно-европейский журнал передовых технологий.* 2006. № 4/3 (22). С. 54–64.
16. Колычев В. А., Миронов К. А., Тынъянова И. И. Применение упрощенной модели рабочего процесса для расчета и анализа энергетических характеристик высоконапорной радиально-осевой гидротурбины. *Вісник Нац. техн. ун-та «ХПІ».* Харків: НТУ «ХПІ». 2004. № 11. С. 109–120.
17. Колычев В. А., Миронов К. А., Тынъянова И. И. Метод расчета энергетических характеристик радиально-осевых гидротурбин. *Вісник Нац. техн. ун-та «ХПІ».* Харків: НТУ «ХПІ». 2001. Вип. 129, ч. 1. С. 55–64.
18. Дранковский В. Э., Хавренко М. Ю., Шудрик А. Л. К расчету высоконапорных радиально-осевых обратимых гидромашин. *Вісник Нац. техн. ун-та «ХПІ».* Харків: НТУ «ХПІ». 2016. № 16. С. 31–36.
19. Колычев В. А., Миронов К. А., Тынъянова И. И. Гидродинамические характеристики элементов проточной части и их влияние на энергетические показатели радиально-осевой гидротурбины. *Східно-Європейський журнал передових технологій.* 2010. № 6 (43). С. 3–15.
20. Потетенко О. В., Дранковский В. Э., Крупа Е. С., Вахрушева О. С. Совершенствование рабочих процессов гидротурбин с применением новых конструктивных решений для различных диапазонов напоров. *Вісник Нац. техн. ун-та «ХПІ».* Харків: НТУ «ХПІ». 2014. № 1. С. 49–57.
21. Мараховский М. Б., Гасюк А. И. Математическая модель гидродинамических характеристик элементов проточной части радиально-осевой гидротурбины. Часть 2. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Hydraulic machines and hydraulic units.* Kharkiv: NTU "KhPI". 2018. No. 46 (1322). P. 49–53.

#### References (transliterated)

1. Marakhovskiy M. B., Gasyuk A. I. Matematicheskaya model' gidrodinamicheskikh kharakteristik elementov protochnoy chasti radial'no-osevoy gidroturbiny. Chast' 1 [A mathematical model of the hydrodynamic characteristics of the elements of the flow part of a radial-axial hydraulic turbine. Part 1]. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Hydraulic machines and hydraulic units.* Kharkiv, NTU "KhPI" Publ., 2018, no. 42 (948), pp. 17–22.
2. Kolychev V. A., Drankovskiy V. E., Marakhovskiy M. B. *Raschet gidrodinamicheskikh kharakteristik napravlyayushchikh apparatov gidroturbin* [Calculation of hydrodynamic characteristics of hydroturbine guide vanes]. Kharkov, NTU "KhPI" Publ., 2002. 216 p.
3. Kolychev V. A. *Kinematicheskie kharakteristiki potoka v lopastnykh gidromashinakh* [Kinematic characteristics of the flow in blade hydraulic machines]. Leningrad, ISMO Publ., 1995.
4. Kolychev V. A., Tyn'yanova I. I. Priblizhennyi metod rascheta kinematicheskikh parametrov potoka v protochnoy chasti radial'no-osevoy gidroturbiny [Approximate method of calculating the kinematic parameters of the flow in the flow part of the radial-axial hydraulic turbine]. *Visnyk Nats. tekh. un-ta "KhPI". Seriya: Enerhetychni i teplotekhnichni protsesy i ustatkuvannya* [Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Energy and heat engineering processes and equipment]. Kharkiv, NTU "KhPI" Publ., 2014, no. 1, pp. 58–68.
5. Potetenko O. V., Shevchenko N. G., Radchenko L. R., Kovalev S. M., Dyachenko K. S. Analiz vikhrevoy struktury potoka v kanalakh radial'no-osevoy gidroturbiny na napory 400–500 m [Analysis of the vortex structure of the flow in the channels of a radial-axial hydraulic turbine at a pressure of 400–500 m]. *Vestnik Nats. tekh. un-ta "KhPI": sb. nauch. tr. Temat. vyp.: Energeticheskie i teplotekhnicheskie protsessy i oborudovanie* [Bulletin of the National Technical University "KhPI": a collection of scientific papers. Thematic issue: Energy and heat engineering processes and equipment]. Kharkov, NTU "KhPI" Publ., 2004, no. 12, pp. 45–55.
6. Potetenko O. V., Shevchenko N. G., Radchenko L. R., Kovalev S. M., Podvoyskiy Yu. A. Osnovnye parametry i zakonemernosti struktury potoka v vysokonapornykh gidroturbinakh RO 400–500 [The main parameters and patterns of flow structure in high-pressure hydraulic turbines RO 400–500]. *Vestnik Nats. tekh. un-ta "KhPI": sb. nauch. tr.* [Bulletin of the National Technical

- University "KhPI": a collection of scientific papers]. Kharkov, NTU "KhPI" Publ., 2004, no. 11, pp. 68–75.
7. Mironov K. A., Barlit V. V., Rao S., Kharvani L. K. Uluchshenie energeticheskikh pokazateley rabochikh koles gidroturbiny RO500 pri pomoshchi chislennogo modelirovaniya techeniya v protochnoy chasti [Improving the energy performance of the impellers of the RO500 turbine with the help of numerical simulation of the flow in the flow part]. *Visnyk Nats. tekhn. un-ta "KhPI"* [Bulletin of the National Technical University "KhPI"]. Kharkiv, NTU "KhPI" Publ., 2004, no. 12, pp. 41–48.
  8. Mironov K. A. Proektirovanie rabochikh koles radial'no-osevoy vysokonapornoy gidroturbiny na parametry GES Kameng [Design of impellers radial-axial high-pressure hydraulic turbine on the parameters of hydroelectric Kameng]. *Vestnik Nats. tekhn. un-ta "KhPI": sb. nauch. tr. Temat. vyp.: Tekhnologii v mashinostroeni* [Bulletin of the National Technical University "KhPI": a collection of scientific papers. Thematic issue: Technologies in mechanical engineering]. Kharkov, NTU "KhPI" Publ., 2010, no. 24, pp. 69–76.
  9. Mironov K. A. Razrabotka radial'no-osevykh rabochikh koles s vysokimi energeticheskimi pokazatelyami [Development of radial-axial impellers with high energy performance]. *Naukovyy visnyk budivnytstva* [Scientific Bulletin of civil engineering]. Kharkiv, HDTUBA, HOTV ABU Publ., 2011, no. 66, pp. 411–415.
  10. Kolychev V. A., Tyn'yanova I. I., Mironov K. A. Primenenie bezrazmernykh parametrov dlya analiza rabochego protsessa gidroturbin [The use of dimensionless parameters for the analysis of the working process of hydraulic turbines]. *Visnyk Nats. tekhn. un-ta "KhPI"* [Bulletin of the National Technical University "KhPI"]. Kharkiv, NTU "KhPI" Publ., 2005, no. 28, pp. 79–88.
  11. Kolychev V. A., Tyn'yanova I. I., Mironov K. A. Primenenie bezrazmernykh parametrov dlya analiza energeticheskikh kharakteristik radial'no-osevykh gidroturbin [The use of dimensionless parameters for the analysis of energy characteristics of radial-axial hydraulic turbines]. *Vostochno-evropeyskiy zhurnal peredovykh tekhnologiy*. 2008, vol. 4, no. 5, pp. 49–57.
  12. Kolychev V. A., Mironov K. A., Tyn'yanova I. I., Tsekhmistro L. N., Drankovskiy V. E., Sergeev A. V. Raschet i analiz balansa poter' energii v vysokonapornoy radial'no-osevoy gidravlicheskoj turbine [Calculation and analysis of the energy loss balance in a high-pressure radial-axial hydraulic turbine]. *Skhidno-Yevropeys'kyy zhurnal peredovykh tekhnologiy*. 2005, no. 1/2 (13), pp. 95–106.
  13. Kolychev V. A., Mironov K. A., Tyn'yanova I. I. Modelirovanie energeticheskikh kharakteristik gidroturbin na nachal'nom etape proektirovaniya [Modeling the energy characteristics of hydroturbines at the initial design stage]. *Skhidno-Yevropeys'kyy zhurnal peredovykh tekhnologiy*. 2010, no. 6 (43), pp. 27–37.
  14. Kolychev V. A., Mironov K. A., Tyn'yanova I. I. Soglasovanie elementov protochnoy chasti pri proektirovanii radial'no-osevykh gidroturbin [Coordination of elements of the flow part in the design of radial-axial hydro turbines]. *Problemy mashinostroeniya*. 2009, vol. 12, no. 5, pp. 3–8.
  15. Kolychev V. A., Mironov K. A., Tyn'yanova I. I. Obschchie zakonomernosti rabochego protsessa i ikh primenenie dlya rascheta i analiza energeticheskikh kharakteristik gidroturbin [General regularities of the working process and their application for the calculation and analysis of the energy characteristics of hydroturbines]. *Vostochno-evropeyskiy zhurnal peredovykh tekhnologiy*. 2006, no. 4/3 (22), pp. 54–64.
  16. Kolychev V. A., Mironov K. A., Tyn'yanova I. I. Primenenie uproshchennoy modeli rabochego protsessa dlya rascheta i analiza energeticheskikh kharakteristik vysokonapornoy radial'no-osevoy gidroturbiny [Application of a simplified workflow model for calculating and analyzing the energy characteristics of a high-pressure radial-axial hydraulic turbine]. *Visnyk Nats. tekhn. un-ta "KhPI"* [Bulletin of the National Technical University "KhPI"]. Kharkiv, NTU "KhPI" Publ., 2004, no. 11, pp. 109–120.
  17. Kolychev V. A., Mironov K. A., Tyn'yanova I. I. Metod rascheta energeticheskikh kharakteristik radial'no-osevykh gidroturbin [The method of calculating the energy characteristics of radial-axial hydraulic turbines]. *Visnyk Nats. tekhn. un-ta "KhPI"* [Bulletin of the National Technical University "KhPI"]. Kharkiv, NTU "KhPI" Publ., 2001, issue 129, part 1, pp. 55–64.
  18. Drankovskiy V. E., Khavrenko M. Yu., Shudrik A. L. K raschetu vysokonapornykh radial'no-osevykh obratimnykh gidromashin [To the calculation of high-pressure radial-axial reversible hydraulic machines]. *Visnyk Nats. tekhn. un-ta "KhPI"* [Bulletin of the National Technical University "KhPI"]. Kharkiv, NTU "KhPI" Publ., 2016, no. 16, pp. 31–36.
  19. Kolychev V. A., Mironov K. A., Tyn'yanova I. I. Gidrodinamicheskie kharakteristiki elementov protochnoy chasti i ikh vliyanie na energeticheskie pokazateli radial'no-osevoy gidroturbiny [Hydrodynamic characteristics of the elements of the flow part and their effect on the energy performance of a radial-axial hydraulic turbine]. *Skhidno-Yevropeys'kyy zhurnal peredovykh tekhnologiy*. 2010, no. 6 (43), pp. 3–15.
  20. Potetenko O. V., Drankovskiy V. E., Krupa E. S., Vakhrusheva O. S. Sovershenstvovanie rabochikh protsessov gidroturbin s primeneniem novykh konstruktivnykh resheniy dlya razlichnykh diapazonov naporov [Improving the working processes of hydraulic turbines with the use of new design solutions for various pressure ranges]. *Visnyk Nats. tekhn. un-ta "KhPI"* [Bulletin of the National Technical University "KhPI"]. Kharkiv, NTU "KhPI" Publ., 2014, no. 1, pp. 49–57.
  21. Marakhovskiy M. B., Gasyuk A. I. Matematicheskaya model' gidrodinamicheskikh kharakteristik elementov protochnoy chasti radial'no-osevoy gidroturbiny. Chast' 2 [Mathematical model of hydrodynamic characteristics of the elements of the flow part of the radial-axial hydraulic turbine. Part 2]. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Hydraulic machines and hydraulic units*. Kharkiv, NTU "KhPI" Publ., 2018, no. 46 (1322), pp. 49–53.

Поступила (received) 24.04.2019

*Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors*

**Мараховський Михайло Борисович (Marakhovskiy Mikhail Borisovich, Marakhovsky Mikhail)** – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри «Гідравлічні машини ім. Г. Ф. Проскури»; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7445-9277>; e-mail: [marakhovsky@ecopolitech.com](mailto:marakhovsky@ecopolitech.com)

**Гасюк Олександр Іванович (Gasyuk Alexander Ivanovich, Gasiyuk Alexander)** – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри «Гідравлічні машини ім. Г. Ф. Проскури»; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6347-8501>; e-mail: [galexfo@gmail.com](mailto:galexfo@gmail.com)

**Панамарьова Ольга Борисівна (Panamariova Olga Borisovna, Panamariova Olga)** – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри «Гідравлічні машини ім. Г. Ф. Проскури»; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4080-4532>; e-mail: [agattaold@gmail.com](mailto:agattaold@gmail.com)

**Ярошенко Олексій Андрійович (Yaroshenko Aleksii Andreevich, Yaroshenko Aleksii)** – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», магістр кафедри «Гідравлічні машини ім. Г. Ф. Проскури»; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9202-1834>; e-mail: [oleksii.yaroshenko@mit.khpi.edu.ua](mailto:oleksii.yaroshenko@mit.khpi.edu.ua)