

**К. А. МИРОНОВ**, канд. техн. наук, доц., НТУ «ХПИ», Харьков;  
**И. И. ТЫНЬЯНОВА**, канд. техн. наук, ст. преп., НТУ «ХПИ», Харьков;  
**А. А. ГУЛАХМАДОВ**, аспирант, НТУ «ХПИ», Харьков

## **СОЗДАНИЕ ВЫСОКОЭФФЕКТИВНЫХ ПРОТОЧНЫХ ЧАСТЕЙ ВЫСОКОНАПОРНЫХ РАДИАЛЬНО-ОСЕВЫХ ГИДРОТУРБИН**

В работе рассмотрены вопросы повышения энергетических показателей проточных частей высоконапорных гидротурбин. Исследовалось влияние геометрических параметров лопастной системы рабочего колеса и формы профилей лопатки направляющего аппарата на формирование энергокавитационных качеств гидротурбины. Из.: 6. Библиогр.: 22 назв.

© К. А. МИРОНОВ, И. И. ТЫНЬЯНОВА, А. А. ГУЛАХМАДОВ, 2012

**Ключевые слова:** гидротурбина, проточная часть, рабочее колесо, направляющий аппарат.

**Вступление.** Совершенствование проточных частей (ПЧ) гидротурбины (ГТ) базируется на проведении обширных численных исследований, в процессе которых осуществляется поиск наиболее рациональных вариантов. В основе такого поиска лежит многовариантный численный анализ влияния геометрических и режимных параметров отдельных элементов ПЧ на энергетические показатели ГТ.

Применение ЭВМ при проектировании ПЧ имеет определенные преимущества: значительное уменьшение затрат времени на разработку новой ПЧ; возможность реализации более совершенных алгоритмов, как на стадии проектирования, так и на стадии прогнозирования характеристик новой ПЧ; возможность реализации численного эксперимента, что позволяет минимизировать количество изготавливаемых моделей и затрат на физический эксперимент.

**Анализ последних исследований и литературы.** Для решения этой задачи используются как упрощенные модели течения, так и более сложное кинематическое описание потока с помощью квазитрехмерных и трехмерных моделей течения жидкости [1-4].

Разработка высокоэффективных ПЧ связано с совершенствованием лопастной системы рабочего колеса (РК) ГТ, что представляет собой довольно длительный итерационный процесс. На кафедре гидромашин НТУ «ХПИ» накоплен обширный опыт проектирования и прогнозирования энергокавитационных характеристик радиально-осевых (РО) РК [5–18], подтвержденный экспериментальными исследованиями.

**Цель исследования** – разработка в сжатые сроки ПЧ высоконапорных РО ГТ с высокими энергокавитационными показателями.

**Материалы и результаты исследования.** Для профилирования лопастной системы РК необходимо определить форму меридионального потока. В принятой полости РК, на основании результатов экспериментальных и расчетных исследований потока ГТ близкой быстроходности рассчитывают меридиональный поток. Поток в полости РК типа РО500 был принят

равноскоростным. Такое допущение приемлемо при построении потока в тихоходных РО РК, когда поворот потока осуществляется достаточно плавно.

В случае равноскоростного потока градиент давления вдоль нормалей к поверхностям тока  $\partial p / \partial n \cong 0$ . Значительное нарушение равновесия потока на обеих сторонах лопасти ведет к смещению расхода к одному из ободьев РК. Если поток смещается в направлении втулки, то крутящий момент РК снижается; следовательно, уменьшается КПД турбины. Кроме того, нарушение равновесия на одной из сторон лопасти вызывает неодинаковое смещение линий тока на лицевой и тыльной сторонах лопасти. Пересечение линий тока в лопастном канале приводит к образованию вторичных течений, возникновению вихрей и увеличению потерь энергии как в РК, так и в отсасывающей трубе.

Профилирование лопастной системы РК выполнялось одномерным методом при заданном положении входной и выходной кромок лопасти с последующим отображением на конформную поверхность. Для удобства в качестве конформной поверхности выбран цилиндр диаметром 1 метр. Это позволяет сравнивать все профили на единой развертке [15].

Форма полости, положение входной и выходной кромок были выбраны, ориентируясь на лучшие РК близкой быстроходности, разработанные на кафедре гидромашин НТУ «ХПИ» (рис. 1). Расчетные параметры оптимального режима были приняты следующие:  $Q_1 = 150 \text{ л/с}$ ;  $n_1 = 60 \text{ мин}^{-1}$ .

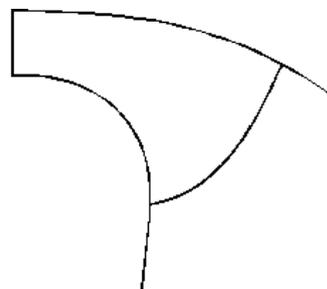


Рис. 1. Меридиональная проекция РК РО500

С целью расчетной оценки ожидаемых энергокавитационных показателей спроектированного РК выполнен расчет обтекания решёток профилей лопастной системы РК на криволинейных поверхностях тока в слое переменной толщины, который осуществлялся методом ЦКТИ [19, 20] для трех решеток профилей (ступица, средняя, нижний обод). Задачей расчета являлось определение значений относительной скорости  $W(S)$  и давления  $\bar{p}(S)$  на лицевой и тыльной сторонах профилей решеток спрофилированной лопастной системы РК; определение профильных, ударных, циркуляционных потерь, осредненных параметров потока в межлопастных каналах и момента скорости  $(rCu)_2$  на выходе из решеток. Также определялись параметры оптимального режима.

Для обеспечения условия равновесия потока ( $\partial p / \partial n \cong 0$ ) и уменьшения вторичных течений в полости РК необходимо обеспечить минимальный градиент давления вдоль нормалей к поверхностям тока. Увеличение выходного угла лопасти у обода РК (рис. 2) привело к уменьшению градиента давления вдоль нормалей к поверхностям тока. Что должно привести к уменьшению вторичных течений в каналах и полости РК, т.е. к уменьшению вызванных этим явлением потерь энергии.

Также спроектированное РК имеет небольшую положительную закрутку потока вблизи втулки и нижнего обода, что позволяет предположить хорошее согласование РК и отсасывающей трубы [11, 17, 18]. Расчет проводился для РК с разным числом лопастей  $z=9$ ;  $z=13$ ;  $z=17$ . Результаты расчета приведены в табл. 1.

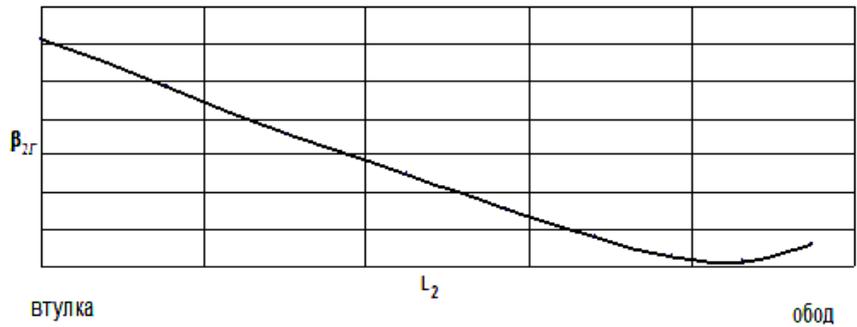


Рис. 2. Геометрические углы  $\beta_{2r}(L_2)$  вдоль выходной кромки РК РО 500

Таблица 1 - Результаты расчета энергокавитационных характеристик РК

Вариант	$z_{PK}$	$\Sigma h$	$\sigma$
1	9	2,16	0,053
2	13	1,54	0,04
3	17	1,3	0,025

В высоконапорных гидротурбинах существенную роль в общем балансе потерь составляют потери энергии в направляющем аппарате (НА) [21]. Поэтому при профилировании лопастной системы РК необходимо учитывать структуру потока за лопатками НА, которая зависит от формы полости в зазоре между лопастными системами НА и РК (рис. 3).

В работе была проведена оценка влияния формы профиля лопатки НА (рис. 4) на формирование оптимального режима. Получены параметры оптимального режима с тремя различными формами профиля лопаток НА (табл. 2).

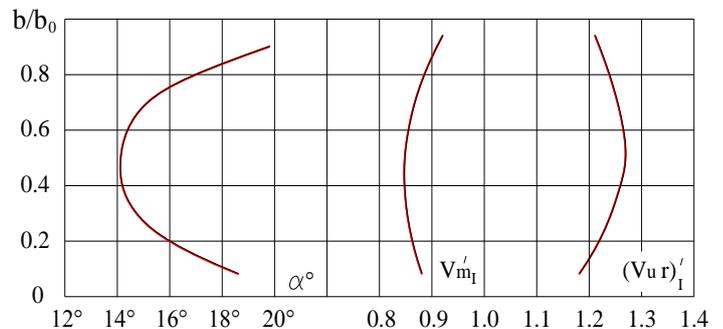


Рис. 3. Структура потока за НА на оптимальном режиме работы ГТ РО 500



Рис. 4. Формы профилей НА: а - положительной кривизны; б - отрицательной кривизны; в – симметричная

Таблица 2- Влияние формы НА на формирование оптимального режима

Вариант	$Q'_{onm}$	$n'_{1onm}$	$\alpha_{0onm}$	$\Sigma h_{НА}$	$\eta_{ГТ}$
а	152	60,24	11,85	3,88	92,2
б	146	60,13	11,16	3,45	92,8
в	147	60,2	11,31	3,16	93

В результате расчета были получены значения отдельных видов потерь в НА в проточной части (ПЧ) ГТ. НА с симметричным профилем имеет минимальные потери энергии в области оптимальных расходов, а с лопаткой отрицательной кривизны в области максимальных расходов [21]. Если планируется работа ГТ типа РО500 только на оптимальном режиме или при максимальном расходе на расчетном режиме,

то целесообразнее вместо НА использовать сопловой аппарат [22].

Проектирование РК и построение прогнозной универсальной характеристики ПЧ ГТ (рис. 5) выполнялось при помощи комплекса прикладных программ, описание и блок-схема которого приведены в работах [10, 13, 14].

На рис. 6 приведены

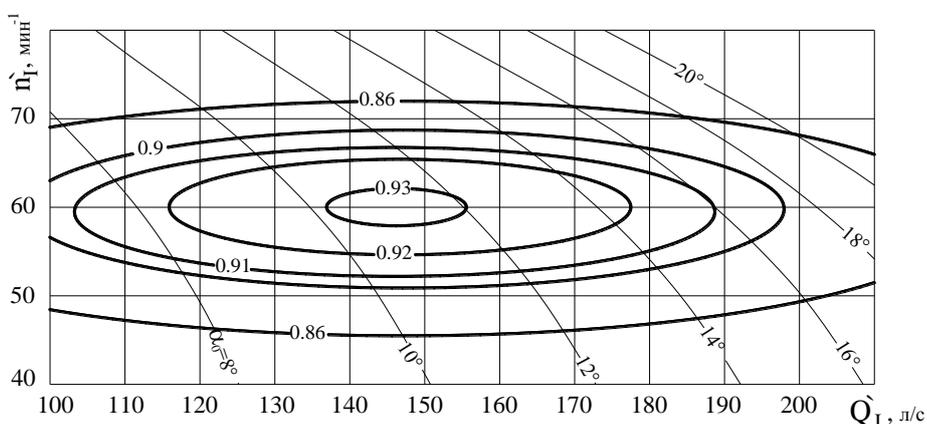


Рис. 5. Прогнозная универсальная характеристика ГТ типа РО500 с симметричным НА

зависимости отдельных видов потерь от приведенного расхода  $\frac{\bar{h}_i}{H} = f\left(\frac{Q'_1}{Q'_{onm}}\right)$

при  $n'_{1onm} = const$  и от приведенных оборотов  $\frac{\bar{h}_i}{H} = f\left(\frac{n'_1}{n'_{onm}}\right)$  при  $Q'_{onm} = const$

для РО ГТ РО500. Анализ баланса потерь необходим для выяснения условий формирования оптимального режима и степени согласования элементов ПЧ.

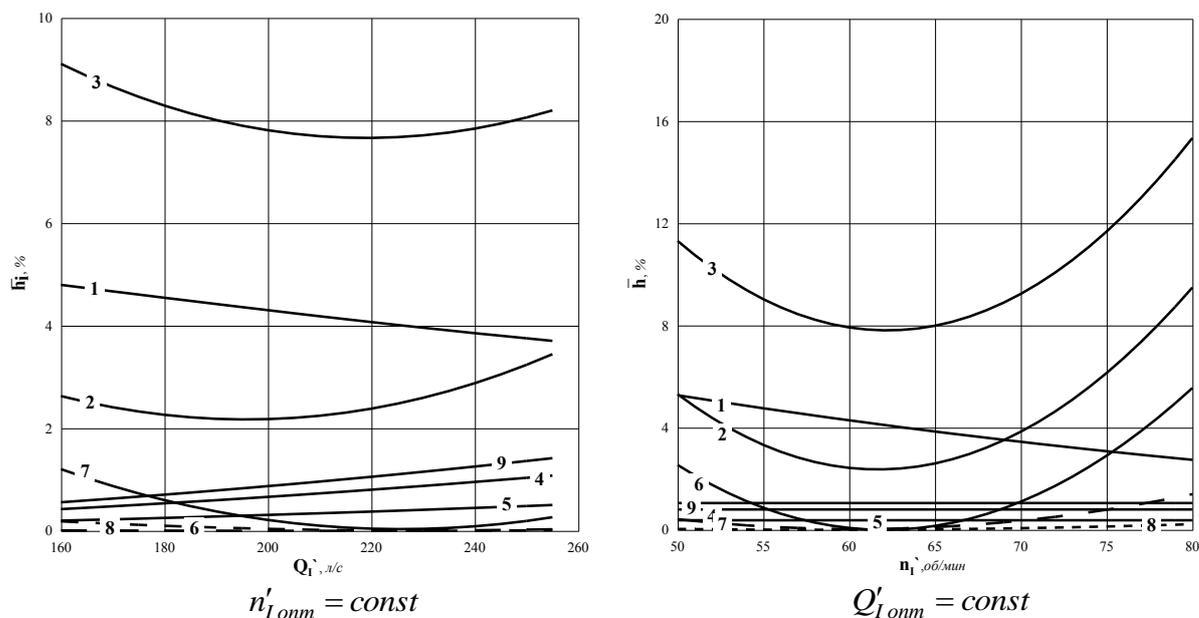


Рис. 6. Зависимость потерь в ПЧ: 1-суммарные потери в подводе, 2-суммарные потери в рабочем колесе и отсасывающей трубе, 3-суммарные потери во всей ПЧ, 4-потери трения в рабочем колесе, 5-кромочные потери, 6-ударные потери, 7-циркуляционные потери, 8-потери от осевого вихря, 9-потери трения в отсасывающей трубе

Приведенные расчетные данные позволяют сделать выводы о влиянии отдельных видов гидравлических потерь на параметры оптимального режима, а также о их влиянии на характер изменения КПД при удалении от оптимального режима, т.е. о пологости кривых  $\frac{\eta}{\eta_{\max}} = f\left(\frac{Q'_i}{Q'_{onm}}\right)$  при  $n'_{I onm} = const$  и

$$\frac{\bar{h}_i}{H} = f\left(\frac{n'_i}{n'_{onm}}\right) \text{ при } Q'_{I onm} = const.$$

**Заключение.** Спроектирована ПЧ высоконапорной РО ГТ с высокими энергетическими показателями. РК типа РО500 для полученной ПЧ должно обеспечить повышение максимального КПД за счет более сбалансированного потока в нем как вдоль лопастей, так и по размаху лопасти и снижению вторичных течений в области РК. Проведено численное исследование влияния формы профилей лопатки НА на формирование параметров оптимального режима ГТ. Выполнено построение прогнозной универсальной характеристики ГТ.

**Список литературы:** 1. *Lauder B. E., Spalding D. B.* The Numerical Computation of Turbulent Flows. //Comp. Meth. Appl. Mech. Eng. – 1974. – Vol. 3. – P. 269-289. 2. *Wilcox D. C.* Turbulence Modeling for CFD // DCW Industries, Inc., 1993. – 460 с. 3. *Ruprecht A.* Unsteady Flow Simulation in Hydraulic Machinery. – 2002. – Vol. 6, no 1. – P. 187-208. 4. *Thum Susanne.* Optimization of Hydraulic Machinery Bladings by Multilevel CFD Techniques // International Journal of Rotating Machinery. – 2005. – Vol. 2. – P. 161–167. 5. *Колычев В. А.* О задании краевых условий в задаче осесимметричного движения жидкости в области рабочего колеса высоконапорной радиально-осевой гидротурбины / В. А. Колычев // Гидравлические машины, 1981. – Вып. 15. – С. 51-58. 6. *Барлут В. В.*

Анализ экспериментальных данных потока в проточной части тихоходной радиально-осевой гидротурбины / *В. В. Барлит, В. К. Шеховцов* [и др.] // «Гидравлические машины», 1986. – Вып. 20. – С. 53-59. **7.** *Колычев В. А.* Метод расчета энергетических характеристик радиально-осевых гидротурбин / *В. А. Колычев, К. А. Миронов* [и др.] // Вісник Національного технічного університету “Харківський політехнічний інститут”. – Харків : НТУ “ХПИ”, 2001. – Вып. 129. – Ч. 1. – С. 55–64. **8.** *Потетенко О. В.* Основные параметры и закономерности структуры потока в высоконапорных гидротурбинах РО 400-500 / *О. В. Потетенко, Н. Г. Шевченко, Л. Р. Радченко, С. М. Ковалев, Ю. А. Подвойский* // Вестник НТУ «ХПИ»: Сб. науч. трудов. – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2004. – № 11. – С. 68-75. **9.** *Потетенко О. В.* Анализ вихревой структуры потока в каналах радиально-осевой гидротурбины на напоры 400-500 м / *О. В. Потетенко, Н. Г. Шевченко* [и др.] // Вестник НТУ «ХПИ»: Сб. науч. трудов. – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2004. – № 12. – С. 45-55. **10.** *Колычев В. А.* Применение упрощенной модели рабочего процесса для расчета и анализа энергетических характеристик высоконапорной радиально-осевой гидротурбины / *В. А. Колычев, К. А. Миронов, И. И. Тыньянова* [и др.] // Вісник Національного технічного університету “Харківський політехнічний інститут”. – Харків : НТУ “ХПИ”, 2004. – № 11. – С. 109–120. **11.** *Миронов К. А.* Улучшение энергетических показателей рабочих колес гидротурбины РО500 при помощи численного моделирования течения в проточной части / *К. А. Миронов, В. В. Барлит* [и др.] // Вісник Національного технічного університету “Харківський політехнічний інститут”. – Харків: НТУ “ХПИ”, 2004. – № 12. – С. 41-48. **12.** *Колычев В. А.* Расчет и анализ баланса потерь энергии в высоконапорной радиально-осевой гидравлической турбине / *В. А. Колычев, К. А. Миронов, И. И. Тыньянова* [и др.] // Східно-Європейський журнал передових технологій. – Харків, 2005. – № 1/2 (13). – С. 95–106. **13.** *Колычев В. А.* Общие закономерности рабочего процесса и их применение для расчета и анализа энергетических характеристик гидротурбин / *В. А. Колычев, И. И. Тыньянова, К. А. Миронов* // Восточно-европейский журнал передовых технологий, № 4/3 (22). – Харьков, 2006. – С. 54-64. **14.** *Миронов К. А.* Комплекс прикладных программ для проектирования и расчета радиально-осевых рабочих колес гидротурбин // Вісник Національного технічного університету “Харківський політехнічний інститут”. – Харків: НТУ “ХПИ”, 2007. – № 17. – С. 18–25. **15.** *Барлит В. В.* Расчет и проектирование проточной части реактивных гидротурбин на основе численного моделирования рабочего процесса : учеб. пособие / *В. В. Барлит, К. А. Миронов* [и др.]. – Харьков: НТУ “ХПИ”, 2008. – 216 с. **16.** *Колычев В. А.* Согласование элементов проточной части при проектировании радиально-осевых гидротурбин / *В. А. Колычев, К. А. Миронов, И. И. Тыньянова* // Пробл. машиностроения, т. 12, № 5. – Харьков, 2009. – С. 3-8. **17.** *Миронов К. А.* Проектирование рабочих колес радиально-осевой высоконапорной гидротурбины на параметры ГЭС Каменг // Вестник НТУ «ХПИ». Сб. науч. трудов. Тематический выпуск «Технологии в машиностроении». – Харьков: НТУ «ХПИ». – № 24. – 2010. – С. 69-76. **18.** *Миронов К. А.* Разработка радиально-осевых рабочих колес с высокими энергетическими показателями // Науковий вісник будівництва. – Харків: ХДТУБА, ХОТВ АБУ. – № 66. – 2011. – С. 411-415. **19.** *Раухман Б. С.* Расчет обтекания пространственных решеток профилей гидротурбин с программированием на ЭЦВМ. РТМ 24.023.07. – Л. –1972. – 52 с. **20.** *Барлит В. В.* Расчет обтекания решеток профилей лопастных систем гидромашин: учеб.-метод. пособие / *В. В. Барлит, В. В. Бородаевский, Л. К. Яковлева.* – Харьков: НТУ «ХПИ», 2005. – 56 с. **21.** *Барлит В. В.* Разработка и численное исследование подвода высоконапорной гидротурбины РО500 / *В. В. Барлит, П. Н. Сухоребрий* [и др.]. // Вестник НТУ «ХПИ», Вып.9. - т.2. - Харьков, 2003. – С. 33-40. **22.** *Потетенко О. В.* Тенденции продвижения горизонтальных прямооточных и радиально-осевых гидротурбин на высокие напоры с широким диапазоном эксплуатации / *В. Э. Дранковский, Е. С. Крупа* [и др.] // Вісник Сумського державного університету. – Суми, 2010. – №3. – С. 125–135 с.

---

УДК 621.224

**Створення вискоелективних проточних частин високонапірних радіально-осьових гідротурбін/ Миронов К. А., Тиньянова І. І., Гулахмадов А. А. // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Нові рішення у сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2012. – №50(956). – С. 127-133**

В роботі розглянуті питання підвищення енергетичних показників проточних частин високонапірних гідротурбін. Досліджувався вплив геометричних параметрів лопатевої системи робочого колеса та форми профілю лопатки направляючого апарату на формування енергокавітаційних якостей гідротурбіни. Іл.: 6. Бібліогр.: 22 назв.

**Ключові слова:** гідротурбіна, проточна частина, робоче колесо, направляючий апарат.

UDC 621.224

**Highly effective flow space creation of high-head Francis turbines/ Mironov K. A., Tinyanova I. I., Gulakhmadov A. A. // Bulletin of NTU “KhPI”. Subject issue: New decisions of modern technologies. – Kharkov: NTU “KhPI”. – 2012. – № 50(956). P. 127-133**

In the paper discusses the issues of improving the effectiveness of flow space high-head Francis turbines. Influence of geometrical parameters of blade system runner and blade profile of the guide vane high-head Francis turbines on the formation of performance parameters was investigated. Im.: 6. Bibliogr.: 22.

**Key words:** hydroturbine, flow space, runner, guide vane.

*Поступила в редакцію 21.09.2012*