

УДК 621.224

**К.А. МИРОНОВ**, канд. техн. наук; доц. НТУ «ХПИ»;  
**Л.К. ЯКОВЛЕВА**, ст. преп. НТУ «ХПИ»;  
**А.А. ГУЛАХМАДОВ**, аспірант НТУ «ХПИ»

## СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПРОТОЧНЫХ ЧАСТЕЙ РАДИАЛЬНО-ОСЕВЫХ ГИДРОТУРБИН

В статье рассматриваются вопросы о совершенствовании проточных частей радиально-осевых гидротурбин с помощью разработанного комплекса программ. Он применяется для проектирования и расчета лопастных систем радиально-осевых рабочих колес и для построения прогнозной универсальной характеристики радиально-осевой гидротурбины. Приводится блок-схема разработанного комплекса программ и описывается методика проектирования проточных частей радиально-осевых гидротурбин.

**Ключевые слова:** радиально-осевая гидротурбина, проточная часть, рабочее колесо, лопастная система.

### Введение

Повышение стоимости угля, нефти и газа приводит к нехватке энергоресурсов, поэтому роль ГЭС и ГАЭС, в надежности снабжения потребителей электроэнергией, непрерывно возрастает.

Разрабатываемые и поставляемые на рынок гидротурбины (ГТ) должны обеспечивать высокие технико-экономические показатели, надежность и долговечность, что позволит обеспечить высокую конкурентоспособность ГТ на внешнем и внутреннем рынке. Это возможно только в случае существенного улучшения энергетических, кавитационных и других характеристик ГТ, прежде всего, на расчетных режимах работы.

### Цель работы

Совершенствование проточных частей (ПЧ) радиально-осевых (РО) ГТ, путем улучшения их энергокавитационных характеристик.

Для достижения поставленной цели были сформулированы и решены следующие **задачи**:

- разработать методику проектирования ПЧ РО ГТ;
- разработать комплекс программ, позволяющий рассчитывать и прогнозировать энергокавитационные характеристики РО ГТ.

### Решение

Для обеспечения высоких энергокавитационных показателей ПЧ ГТ необходимо проводить всесторонний гидродинамический анализ элементов ПЧ с использованием современных пакетов прикладных программ *CFD*. Данные пакеты позволяют рассчитать вязкий турбулентный поток в полости ГТ любой сложности [1, 2], но данные пакеты можно использовать, в виду их трудоемкости, только после того, когда будут определены геометрические параметры элементов ПЧ ГТ [3–5].

При проектировании лопастной системы нового рабочего колеса (РК) необходимо определить его линейные размеры не с помощью пакетов прикладных программ *CFD*, а каким-нибудь иным способом [3, 4]. На кафедре гидромашин НТУ «ХПИ» разработаны упрощенные модели, учитывающие большое количество факторов: рабочие параметры ГТ, геометрические и кинематические характеристики элементов ПЧ, изменяющиеся в процессе ее проектирования [4, 6, 7].

Разработанная программа позволяет, как проектировать новые, так и модернизировать имеющиеся лопастные системы РК РО ГТ любой быстроходности. После проектирования РК РО ГТ с учетом геометрии элементов подвода (спиральная камера, статор, направляющий аппарат) и отвода (отсасывающая труба) проводится расчет и построение прогнозной универсальной характеристики РО ГТ. Блок-схемы разработанного комплекса программ показаны на рис. 1, 2.

Разработанный комплекс программ позволяет в сжатые сроки спроектировать, рассчитать и спрогнозировать энергокавитационные характеристики РО РК. Он избавляет проектировщика от необходимости выполнения рутинных операций, что значительно уменьшает время необходимое для разработки нового РК. Также оказывает помощь в расчете обтекания лопастных систем и обработке полученных результатов.

В общем случае процесс проектирования лопастной системы РК РО ГТ можно разделить на следующие блоки (рис. 1):

- 1) Выбор параметров расчета.
- 2) Выбор полости РК (из базы данных).
- 3) Расчет и построение меридионального потока в полости РК.
- 4) Задание граничных условий, местоположение входных и выходных кромок лопасти и др.
- 5) Профилирование бесконечно тонкой лопасти.
- 6) Построение профилей конечной толщины на поверхностях тока, компоновка профилей (построение лопасти).
- 7) Учет стеснения потока лопастной системой, корректировка меридионального потока и повторение пунктов 4–6 (2-е приближение).
- 8) Расчет параметров спроектированного РК, его корректировка, если это необходимо.
- 9) Выпуск чертежей.

Весь этот процесс реализован в программе проектирования и расчета РО РК (рис. 1).

В программе реализован одномерный метод профилирования лопастной системы РК на конформном цилиндре, данный метод, в отличие от других одномерных методов [8] более точен и его проще алгоритмизировать. При отображении профиля на конформный цилиндр, его линейные размеры искажаются, а величины углов остаются неизменными.

Идея метода заключается в следующем:

1 Строится конформный цилиндр с заданным углом охвата и выбранным радиусом.

2 На развертке конформного цилиндра по известным углам входа и выхода РК строится профиль бесконечной толщины.

3 Построенный профиль бесконечной толщины наращивается нерасчетным методом по известному закону распределения толщин (в зависимости от быстроходности ГТ).

После выполнения профилирования и построения лопастей конечной толщины рассчитывается структура потока, которая будет в полости РК, с учетом стеснения жидкости лопастной системой.

Для оценки энергокавитационных качеств разработанной лопастной системы выполняется расчет обтекания решеток профилей в слое переменной толщины с помощью метода ЦКТИ [9].

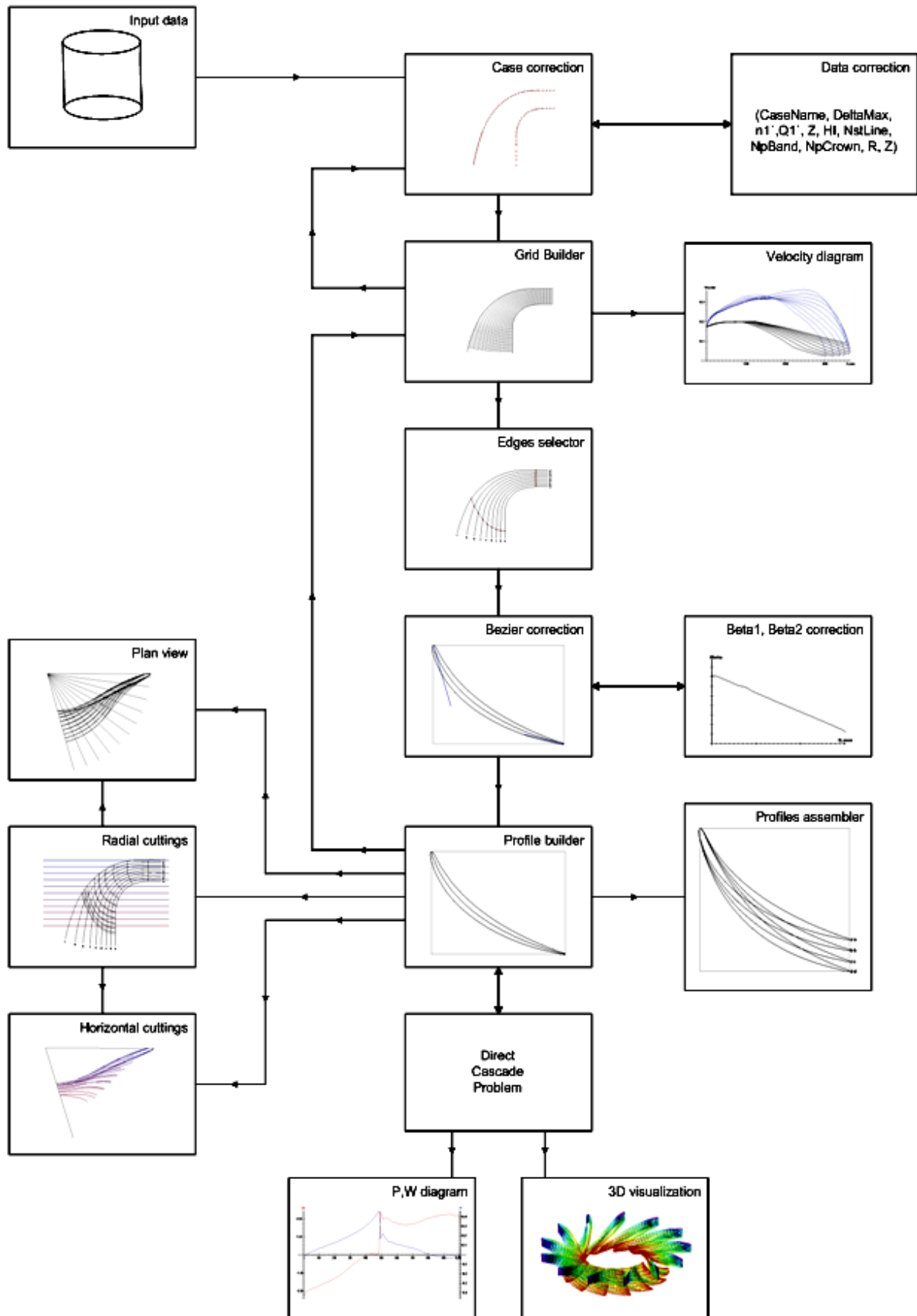


Рис. 1 – Блок-схема програми проектування і розрахунку РО РК

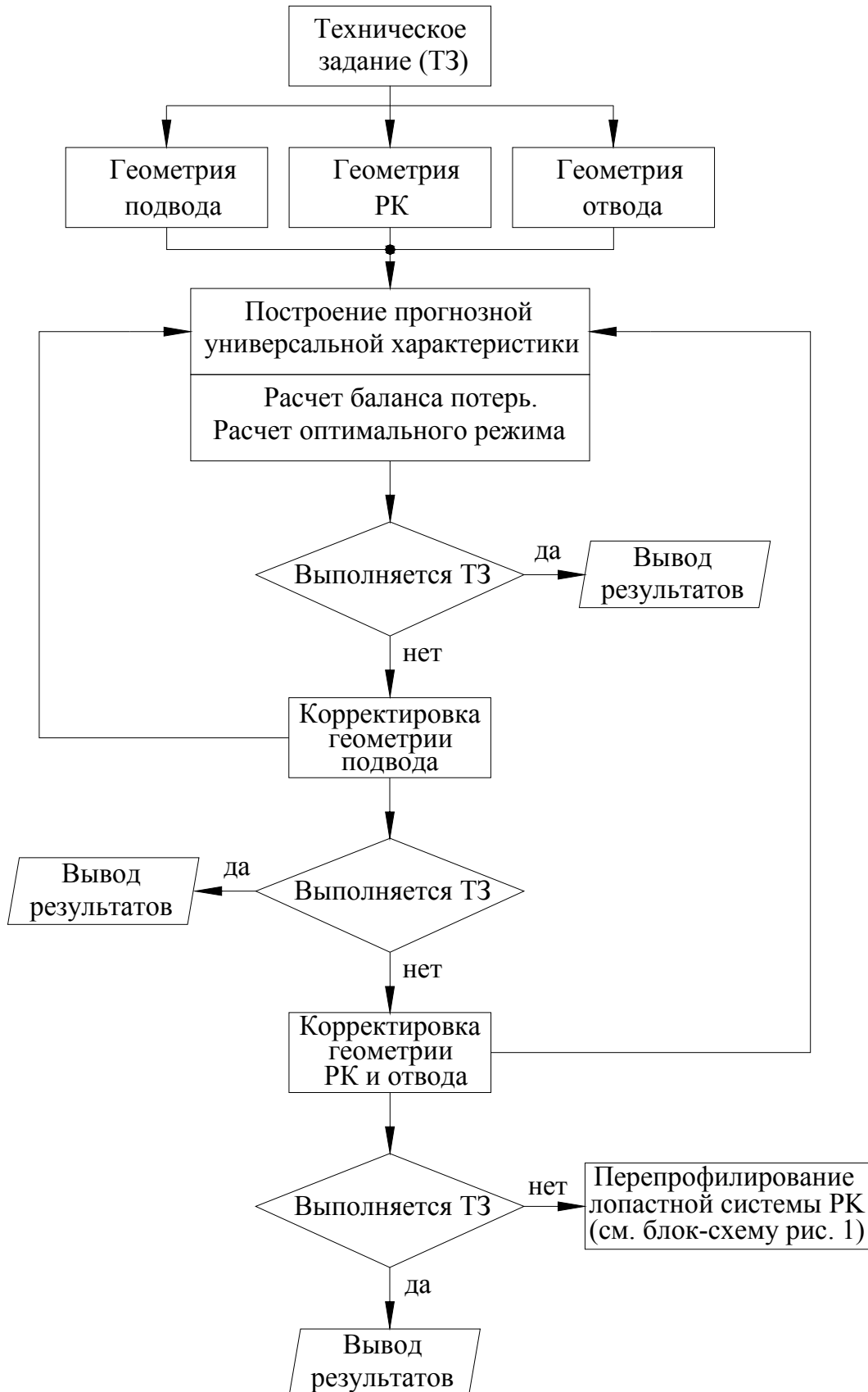


Рис. 2 – Блок-схема программы построения прогнозной универсальной характеристики РО ГТ

Полученные данные о геометрии подвода (на начальных этапах проектирования геометрия подвода выбирается из базы данных, с учетом рекомендаций [10, 11]), лопастной системы РК (рис. 1) и отвода (из базы данных) используются для построения прогнозной универсальной характеристики ГТ (рис. 2) [4, 5, 11].

Методика проектирования ПЧ РО ГТ включает в себя несколько этапов [4, 11]:

1 Первый этап предусматривает согласование элементов ПЧ по кинематическим характеристикам, что приводит к уменьшению гидравлических потерь. Также на первом этапе профилируют лопастные системы, с проверкой их плавности.

2 На втором этапе выполняют расчет обтекания полученных решеток профилей по двумерным моделям, определяются различные, принятые в гидротурбиностроении, категории потерь: ударные, профильные и циркуляционные. Полученные данные позволяют оценить качество спроектированных лопастных систем.

3 Третий этап предусматривает построение прогнозной универсальной характеристики РО ГТ и составление баланса потерь в ней, что позволяет судить о формировании оптимального режима и уровне КПД в целом.

4 На четвертом этапе проводится анализ и выбор направления модификации или модернизации полученной геометрии ПЧ. На завершающей стадии данного этапа проводится оптимизация разработанной ПЧ ГТ. Четвертый этап отводится для трехмерного моделирования разработанной ПЧ РО ГТ. С помощью трехмерных моделей течения *CFD* исследуется в целом картина течения в ПЧ, с учетом взаимного влияния соседних элементов и окончательно корректируется ее геометрия.

Основное внимание при проектировании ПЧ РО ГТ на низкие и средние напоры необходимо уделять совершенствованию лопастных систем РК, т.к. (3–5) % потерь связано с потерями в РК, в подводе и отводе потери составляют (1–2) %. Для высоконапорных РО ГТ потери в РК составляют (1–2) %, а в подводе и отводе до 5 %. Роль направляющего аппарата (НА) в формировании энергетических характеристик высоконапорных ГТ, из всех элементов подвода, наиболее значительна, т.к. потери энергии в НА превышают суммарные потери в спиральной камере и статоре (даже на оптимальном режиме эти потери достигают до 2,5 %). Структура потока и величина потерь энергии в НА зависит от формы профиля лопатки НА и от режима работы ГТ [10–13].

Одним из перспективных направлений совершенствования ПЧ РО ГТ является проектирование комбинированных спиральных камер (по различным законам изменения скорости вдоль спирального канала), различных по форме колонн статора (для каждого квадранта спиральной камеры), специализированных профилей лопаток НА (со скошенной выходной кромкой), X-образных лопастей РК или со сплиттерами, а также с нерадиальными входными и выходными кромками.

### **Выводы**

1 Разработана методика проектирования ПЧ РО ГТ.

2 Предложена программа на языке программирования  $C^{++}$ . Она позволяет в сжатые сроки спроектировать, рассчитать и спрогнозировать характеристики РО РК. С ее помощью проводится численный анализ влияния геометрических параметров разработанных лопастных систем РО РК на их энергокавитационные характеристики.

3 Созданный комплекс программ дает возможность проектировщику, после окончательного выбора геометрических параметров ПЧ, построить прогнозную универсальную характеристику РО ГТ.

**Список литературы:** 1. *Minkowycz, W.J.* Handbook of Numerical Heat Transfer [Text] / W.J. Minkowycz, E.M. Sparrow, J.Y. Murthy. – [2 ed.] – Wiley, 2006. – 984 с. 2. *Paul G. Tucker.* Computation of Unsteady Internal Flows – Fundamental Methods with Case Studies [Text] / Paul G. Tucker. – Springer, 2001. – 376 с. 3. *Brekke, H.* A review on Turbine Design [Text] / H. Brekke // Proc. of the XXI Symp. IAHN. – 9-12 Sept. 2002. – Lausanne, 2002. – P. 1-8. 4. *Барлит, В.В.* Расчет и проектирование проточной части реактивных гидротурбин на основе численного моделирования рабочего процесса [Текст]: учеб. пособие / В.В. Барлит, К.А. Миронов, А.В. Власенко, Л.К. Яковлева. – Х.: НТУ «ХПИ», 2008. – 216 с. 5. *Колычев, В.А.* Моделирование энергетических характеристик гидротурбин на начальном этапе проектирования [Текст] / В.А. Колычев, И.И. Тыньянова, К.А. Миронов // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – Х., 2010. – № 1/6 (43). – С. 27-38. 6. *Миронов, К.А.* Комплекс прикладных программ для проектирования и расчета радиально-осевых рабочих колес гидротурбин [Текст] // Вісник НТУ «ХПІ». – Х.: НТУ «ХПІ», 2007. – № 17. – С. 18-25. 7. *Миронов, К.А.* Ускорение процедуры проектирования и расчета рабочих колес радиально-осевых гидротурбин [Текст] / К.А. Миронов, Л.К. Яковлева, А.А. Гулахмадов // Сборник научных трудов *SWorld*. Материалы международной научно-практической конференции «Современные направления теоретических и прикладных исследований '2013». – Выпуск 1. Том 6. – Одесса: Куприенко, 2013. – ЦИТ: 113-0187. – С. 23-27. 8. *Барлит, В.В.* Гидравлические турбины / В.В. Барлит. – К.: Вища школа, 1977. – 360 с. 9. *Барлит, В.В.* Расчет обтекания решеток профилей лопастных систем гидромашин [Текст]: учеб.-метод. пособие / В.В. Барлит, В.В. Бородаевский, Л.К. Яковлева. – Х.: НТУ «ХПИ», 2005. – 56 с. 10. *Барлит, В.В.* Влияние формы лопатки направляющего аппарата на энергетические характеристики высоконапорной радиально-осевой гидротурбины РО 500 [Текст] / В.В. Барлит, В.В. Бородаевский, А.И. Битгенек [и др.] // Сборник трудов гидравлические машины. – Харьков, 1979. – Вып. 13. – С. 106-114. 11. *Миронов, К.А.* Создание высокоэффективных проточных частей высоконапорных радиально-осевых гидротурбин [Текст] / К.А. Миронов, И.И. Тыньянова, А.А. Гулахмадов // Нові рішення в сучасних технологiях. Вісник НТУ «ХПІ»: Зб. наук. праць. – Х.: НТУ «ХПІ», 2012. – № 50(956). – С. 127-133. – ISSN 2079.3944. 12. *Сухоребрый, П.Н.* Характеристики пространственного турбулентного потока и потери энергии в элементах проточной части гидротурбины РО 500 [Текст] / П.Н. Сухоребрый, В.В. Барлит, В.Э. Дранковский [и др.] // Проблемы машиностроения. – Х., 2004. – Т. 7, № 3. – С. 13-20. 13. *Миронов, К.А.* Улучшение энергетических показателей рабочих колес гидротурбины РО500 при помощи численного моделирования течения в проточной части [Текст] / К.А. Миронов, В.В. Барлит, С. Рао, Л.К. Харвани // Вісник НТУ «ХПІ». – Х.: НТУ «ХПІ», 2004. – № 12. – С. 41-48.

Поступила в редколлегию 13.09.13

УДК 621.224

**Совершенствование проточных частей радиально-осевых гидротурбин** [Текст] / К.А. Миронов, Л.К. Яковлева, А.А. Гулахмадов // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. – Х.: НТУ «ХПІ», 2014. – № 1(1044). – С. 146-151. – Бібліогр.: 13 назв. – ISSN 2078-774X.

У статті розглядаються питання про вдосконалення проточних частин радіально-осьових гідротурбін з допомогою розробленого комплексу програм. Він застосовується для проектування і розрахунку лопатевих систем радіально-осьових робочих коліс і для побудови прогнозуної універсальної характеристики радіально-осьової гідротурбіни. Наводиться блок-схема розробленого комплексу програм і описується методика проектування проточних частин радіально-осьових гідротурбін.

**Ключові слова:** радіально-осьові гідротурбіни, проточна частина, робоче колесо, лопатева система.

The article considers the issues on improvement of flow space in Francis turbine with the help of the developed complex programs. He used to design and calculation of blade system and for the construction of the prediction performance description for a Francis turbine. Provides a block diagram of the developed complex of programs and explains the methodology for the design of flow space in Francis turbine.

**Keywords:** Francis turbine, flow space, runner, blade system.