

*К.А. МИРОНОВ*, канд. техн. наук, НТУ «ХПИ», г. Харків

## **ПРОЕКТИРОВАНИЕ РАБОЧИХ КОЛЕС РАДИАЛЬНО-ОСЕВОЙ ВЫСОКОНАПОРНОЙ ГИДРОТУРБИНЫ НА ПАРАМЕТРЫ ГЭС КАМЕНГ**

Приводиться опис сучасних пакетів прикладних програм для проектування й розрахунку гідротурбін. Дається опис розробленого комплексу прикладних програм для проектування робочих коліс радіально-осьової гідротурбіни. Показано використання розробленого комплексу при проектуванні робочих коліс радіально-осьової гідротурбіни на задані параметри ГЕС.

The description of modern packages of applied programs for designing and calculation of hydroturbine is resulted. The description of the developed complex of applied programs for designing of runners of the Francis turbine is given. Use of the developed complex at designing of runners of the Francis turbine on the set parameters of Hydroelectric Power Station is shown.

**Введение.** Разработка современных гидротурбин (ГТ), обладающих высокими энергокавитационными характеристиками стала возможной благодаря применению современных теоретических и экспериментальных методов исследования рабочего процесса с использованием ЭВМ. В настоящий момент развитие гидромашиностроения неразрывно связано с разработкой более совершенных моделей рабочего процесса и гидродинамических методов расчета проточной части (ПЧ) ГТ, базирующихся на широком использовании ЭВМ.

Применение ЭВМ при проектировании рабочих колес (РК) имеет определенные преимущества:

- значительное уменьшение затрат времени на разработку нового РК;
- возможность реализации более совершенных алгоритмов, как на стадии проектирования, так и на стадии прогнозирования характеристик нового РК;
- возможность реализации численного эксперимента, что позволяет минимизировать количество изготавливаемых моделей и затрат на физический эксперимент.

**Анализ литературных источников.** В настоящее время ведущие фирмы, занимающиеся разработкой и изготовлением лопастных гидромашин, применяют, в частности, следующие пакеты программ [1 - 3]:

1. Пакет программ Q3D-Eu, предназначенный для решения уравнений движения Эйлера квазитрехмерного, квазиустановившегося невязкого потенциального (вихревого) потока в лопастных системах РК.

2. Пакет программ для расчета трехмерного невязкого потока в РК (3D Euler Code) путем решения уравнений неразрывности и количества движения.

3. Пакет программ расчета квазитрехмерного вязкого турбулентного

потока (Q3D Navier Stokes Code) путем совместного расчета потоков на поверхностях тока  $S_1 - S_1$  и на поверхности тока  $S_{2m} - S_{2m}$  осредненного потока в лопастных каналах РК, представляющего течение в меридиональной плоскости  $m - z$ .

4. Пакет программ (3D – Reynolds Averaged Navier Stokes Code/RANS) расчета трехмерного турбулентного вязкого потока в РК или ПЧ. В ходе расчета используют ячейки структурированной сетки и стандартные программы расчета параметров потока в центрах конечных объемов (призм, тетраэдров, заполняющих рассчитываемые области потока). Для расчета турбулентной вязкости используют стандартную модель турбулентности потока  $k - \varepsilon$  и логарифмический закон скорости у обтекаемых поверхностей.

**Цель статьи.** Целью данной работы является описание проектирования РК высоконапорной радиально-осевой (РО) ГТ основанного на применении комплекса прикладных программ (КПП).

**Основные требования, предъявляемые при разработки РК ГТ [4, 5]:**

- значения максимального КПД на оптимальном режиме и средневзвешенного КПД на нерасчетных режимах работы заданы заказчиком;
- величина коэффициента кавитации турбины  $\sigma_T$  не должна превышать принятого значения коэффициента установки турбины  $\sigma_{уст}$  (определенного экономически приемлемой допустимой высотой отсасывания  $H_{с доп}$ , м);
- минимальный уровень пульсаций давления и нестационарности потока при работе гидроагрегата на нерасчетных режимах работы.  
Для выполнения указанных требований необходимо, чтобы:
- РК обеспечило сработку заданного напора на оптимальном и других режимах работы.
- Потери энергии в РК (профильные, ударные, циркуляционные и др. виды потерь, вызванные вторичными течениями) должны быть минимальными.
- Распределение давления на лицевой и тыльной сторонах лопастей (как по их длине, так и по размаху) должно быть равномерным. Чтобы исключить развитую кавитацию непосредственно на входе в РК, пики скоростей на входной части лопасти должны быть минимальными.
- Равномерный поток на выходе из РК, т.е. такое распределение скоростей  $V_{u2}(R_2); V_{m2}(R_2)$  в сечении за РК, при котором потери энергии в отсасывающей трубе и в РК будут минимальными.

В результате численного моделирования течения, т.е. расчета структуры потока и потерь энергии в РК, получают необходимую информацию и выполняют соответствующие модификации РК.

Анализ расчетных данных (структуры) потока и потери энергии в гидравлических элементах ПЧ, полученных в результате применения современ-

ных сертифицированных пакетов прикладных программ и оптимизационных алгоритмов [6], позволили значительно усовершенствовать гидравлические и экономические показатели гидротурбинного оборудования.

Так, например, за последние десятилетия значительно увеличен уровень КПД ГТ. В настоящее время максимальный КПД лучших ПЧ модельных ГТ ( $D_1 \cong 500 \text{ мм}$ ) достиг уже уровня  $\eta_m = 92 - 94\%$ . Следовательно, КПД крупных натуральных турбин равен  $\eta_n = 94 - 96\%$ , что подтверждено их натурными испытаниями непосредственно на ГЭС [7]. Также значительно улучшены кавитационно-эрозионные показатели проектируемых и изготавливаемых ГТ.

Существенно возросла надежность и долговечность гидротурбинного оборудования, благодаря значительному уменьшению нестационарности потока, особенно на нерасчетных режимах работы.

Однако, так как действительный абсолютный поток в ПЧ – турбулентный вязкий, а также неустановившийся  $\frac{\partial(\quad)}{\partial t} \neq 0$ , то его расчет требует большего объема времени расчета. Численный анализ влияния геометрических и режимных параметров с помощью трехмерных методов, даже в узком диапазоне быстроходности, оказывается весьма затруднительным. Еще более сложная задача – использование этих методов в широком диапазоне изменения быстроходности. Поэтому целесообразно использовать более экономичные (с точки зрения требуемого машинного времени) пакеты программ расчета квазиустановившегося потока (осредненные во времени параметры), а трехмерные методы расчета использовать на заключительной стадии проектирования при доводке лопастной системы и ПЧ в целом, для удовлетворения требований заказчика, с последующим физическим экспериментом.

**Проектирование лопастной системы РК.** На кафедре гидромашин НТУ «ХПИ» проводилась научно-исследовательская работа с заводом тяжелого машиностроения БХЭЛ, г. Бопал, Индия. Кафедрой было получено техническое задание на проектирование ПЧ ГЭС Каменг:  $H_{\max} = 531,5 \text{ м}$ ;  $H_p = H_{\min} = 501,22 \text{ м}$ ;  $N_{\max} = 169213 \text{ кВт}$ ;  $N = 4 \times 150 \text{ МВт}$ ;  $H_s = -6,5 \text{ м}$ ;  $n_{\text{ген}} = 428,6 \text{ об/мин}$ .

Было спроектировано РК РО 500-5Вт для данной станции с использованием КПП, разработанного на кафедре гидромашин НТУ «ХПИ», и получена прогнозная универсальная характеристика ПЧ РО ГТ [8, 9]. В основе расчета прогнозных универсальных характеристик ПЧ лежат общие закономерности рабочего процесса и обобщенная ММ рабочего процесса описанные в работе [9].

Подобный комплекс программ для расчета РО РК применяется в институте проблем машиностроения, без построения прогнозных характеристик ПЧ [10].

Описание блок-схемы КПП приведено в работах [8, 11].

Рассмотрим этапы проектирования РК.

РК профилировалось на следующие режимные параметры:  $Q'_{\text{лопт}} = 150 \text{ л/с}$  и  $n'_{\text{лопт}} = 60 \text{ об/мин}$ , для удовлетворения требований заказчика.

Форма полости ( $b_0/D_1$  и  $D_2/D_1$ ), число лопастей РК  $z_{PK}$ , были выбраны ориентируясь на лучшие РК близкой быстроходности, разработанные на кафедре гидромашин НТУ «ХПИ» [12]. Используя статистические данные ведущих машиностроительных фирм [13, 14] был выполнен ряд модификаций полости РК, для удовлетворения требований заказчика. Очертания входной и выходной кромок были выбраны, используя рекомендации, изложенные в работах [4, 12]. Окончательно полученная полость представлена на рис. 1.

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. Структура меридионального потока зависит от принятых очертаний ПЧ, лопастной системы и режима работы ГТ. Поверхности тока в РК можно приближенно построить по данным замеров потока в сечениях перед и за РК. Если такие данные отсутствуют, то на основании опыта проектирования РК близкой быстроходности, меридиональный поток можно принимать равноскоростным или потенциальным.

Поток в полости РК был принят равноскоростным. Такое допущение приемлемо при построении потока в тихоходных РО РК, когда поворот потока осуществляется достаточно плавно. Это утверждение с некоторыми допущениями справедливо для высоконапорных ГТ. Равноскоростной меридиональный поток характеризует одномерное осесимметричное течение жидкости в полости РК, при котором действие центробежных сил на частицу жидкости при их перемещении из радиального направления в осевое не учитывается.

Необходимо также определить или задаться граничными условиями. Граничные условия – величина и направление вектора абсолютной скорости потока на входе и выходе РК. Они определяются на основании параметров  $Q'_{\text{лопт}}$  и  $n'_{\text{лопт}}$ , используемых при проектировании РК, а также в предположении небольшой положительной закрутки за РК, что обеспечивает лучшее согласование РК и отсасывающей трубы.

Учитывая полученные данные равноскоростного меридионального потока в полости РК, определили входные и выходные геометрические углы лопасти.

Входная кромка лопасти РО 500-5Вт принята параллельной оси вращения РК и радиальной (расположенной в радиальной плоскости) (рис. 1). В этом случае угол  $\beta_{1л}^0$  одинаков на всей входной кромке.

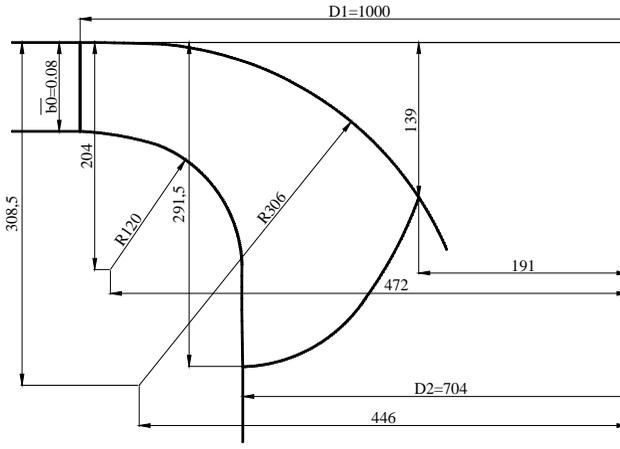


Рис. 1. Полость РК PO500-5Bm

С целью обеспечения заданных параметров оптимального режима  $Q'_{\text{топт}}$  –  $n'_{\text{топт}}$  (минимум потерь), а также для согласования решеток профилей между собой [11], были проанализированы различные законы изменения угла  $\beta_{2r}(L_2)$  вдоль выходной кромки, полученный закон был скорректирован для обеспечения полной сработки циркуляции лопастной системой [11, 15]. Полученный закон распределения угла  $\beta_{2r}$  вдоль выходной кромки для РК показан на рис. 2.

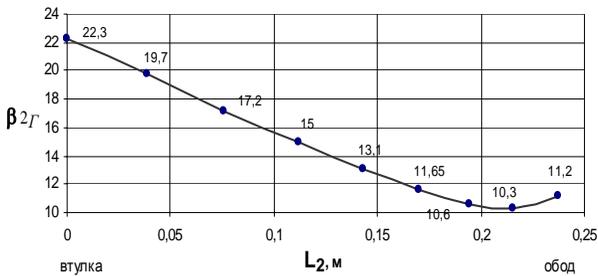


Рис. 2. Геометрические углы  $\beta_{2r}(L_2)$  вдоль выходной кромки РК PO 500-5Bm

Лопастная система была спроектирована с радиальными входной и выходной кромками РК. Использование РК с радиальными кромками обусловлено простотой технологического процесса их изготовления.

Угол охвата лопасти  $\chi$  с одной стороны не должен быть слишком малым, чтобы обеспечить приемлемый уровень кавитации  $\sigma$ , и с другой стороны не должен быть слишком большим, чтобы не завышать профильных потерь. Максимальная толщина не должна быть завышенной, и в тоже время должна удовлетворять условиям прочности.

Исходя из этого, было принято:  $\chi = 65^{\circ}$ ;  $\delta_{\max}=32$  мм (для  $D_l=1000$  мм,  $z=13$ ), профилирование выполнялось с учетом стеснения потока жидкости лопастями РК.

Профилирование лопасти РК выполнялось при помощи метода конформного отображения на единый цилиндр [4].

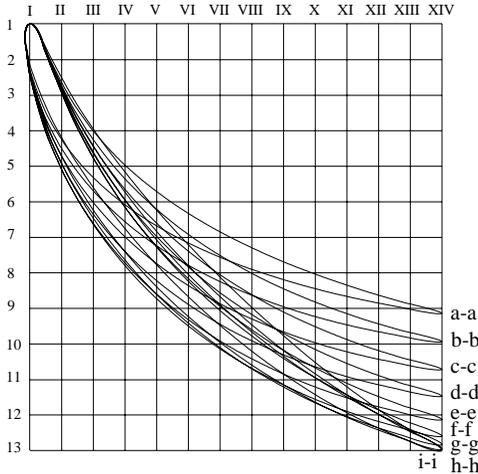


Рис. 3. Конформная диаграмма PO 500-5Vm  
( $R_{ц} = 500$ мм)

При отображении профиля на конформную поверхность, его линейные размеры искажаются, а величина углов остается неизменной. Для удобства в качестве конформной поверхности выбран цилиндр диаметром 1 метр. Это позволяет сравнивать все профили на единой развертке (рис. 3).

Расположение профилей на конформной диаграмме должно обеспечить плавность лопасти, что следует проконтролировать в ходе построения ее радиальных и горизонтальных сечений.

Далее строят радиальные сечения лопасти в меридиональной проекции РК, соблюдая требования конформного отображения при переходе с плоскости на поверхность тока (рис. 4,а,б). Если радиальные сечения недостаточно плавные, необходимо откорректировать форму профилей (их кривизну и взаимное расположение на конформной диаграмме).

Построение горизонтальных сечений А-В-С-... выполняют для окончательного контроля плавности лицевой и тыльной сторон лопасти, изготовления контрольных шаблонов, а также для задания массива координат лицевой и тыльной сторон лопасти (рис. 5,а,б).

После проектирования РК выполняется расчет обтекания его лопастной системы и прогнозирование энергокавитационных показателей всей ПЧ [8, 16].

Полученная лопастная система РК PO 500-5Vm (рис. 6,а,б) была передана заказчику, который изготовил модельное РК (рис. 7) и провел испытания на гидродинамическом стенде. Результаты модельных испытаний показали хорошие энергокавитационные качества спроектированной лопастной системы.

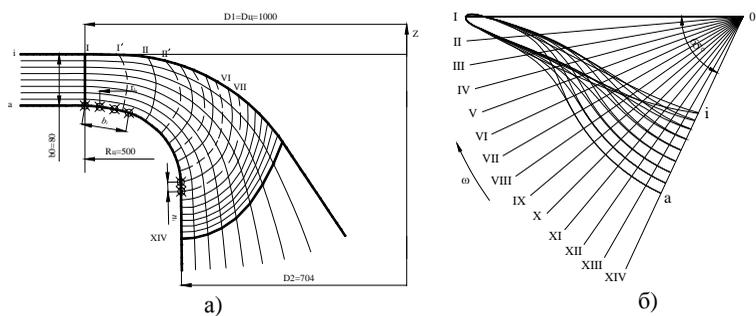


Рис. 4,а,б. Радиальные сечения РК РО 500-5Вм (меридиональная проекция и план)

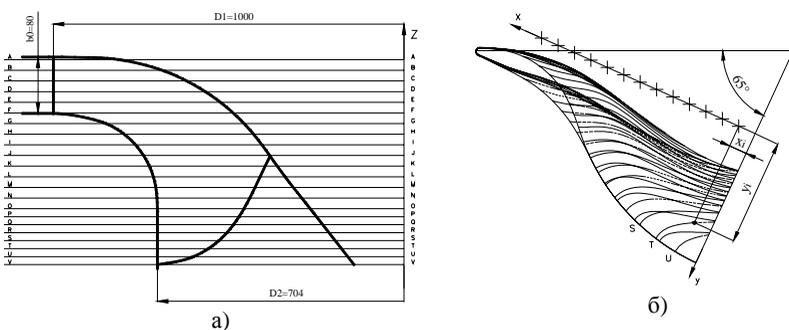


Рис. 5,а,б. Горизонтальные сечения и сечения в плане лопасти РК РО 500-5Вм

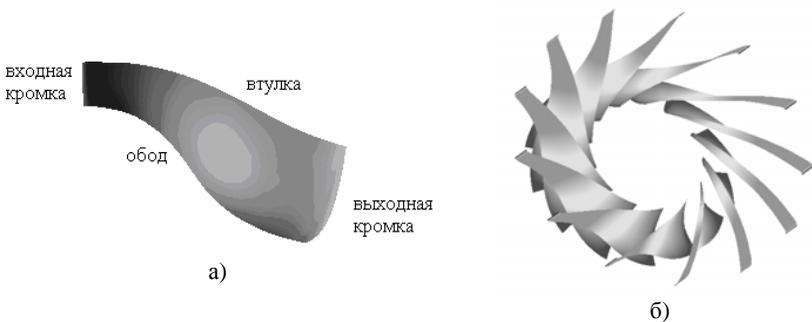


Рис. 6,а,б. Лопастная система РК РО 500-5Вм и колесо без верхнего и нижнего ободов

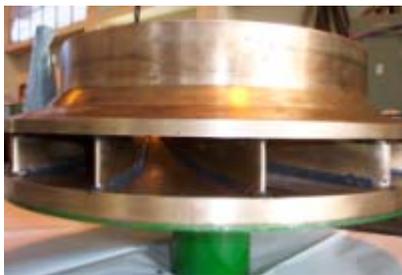


Рис. 7. Модельное рабочее колесо ГТ РО 500-5Вм

**Выводы.** Разработан КПП для проектирования РК РО ГТ. Показано применение КПП на заданные натурные параметры ГЭС Каменг (Индия) при разработке РК РО500-5Вм.

**Список літератури:** 1. *Wilcox David C.* Turbulence Modeling for CFD // DCW Industries, Inc., 1993. – 460 с. 2. *Ruprecht A.* Unsteady Flow Simulation in Hydraulic Machinery. – 2002. – Vol. 6, no 1. – P. 187-208. 3. *Thum Susanne.* Optimization of Hydraulic Machinery Bladings by Multilevel CFD Techniques // International Journal of Rotating Machinery. – 2005. – Vol. 2. – P. 161–167. 4. *Барлит В. В., Миронов К. А. и др.* Расчет и проектирование проточной части реактивных гидротурбин на основе численного моделирования рабочего процесса : учеб. пособие. – Харьков: НТУ “ХПИ”, 2008. – 216 с. 5. *Brekke H.* A review on Turbine Design. – Lausanne, 2002. – P. 1–8. 6. *Enomoto Yasuyuki.* Design optimization of a Francis Turbine runner using multi-objective genetic algorithm // 22nd IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems. - 2004. – P. 126–134. 7. *Sallaberger M.* Accelerated design procedure for Francis runners in rehabilitation projects // Hydro-power & Dams. Issue One. – 2001. – P. 87–92. 8. *Миронов К. А.* Комплекс прикладных программ для проектирования и расчета радиально-осевых рабочих колес гидротурбин // Вісник Національного технічного університету “Харківський політехнічний інститут”. – Харків : НТУ “ХПІ”, 2007. – № 17. – С. 18–25. 9. *Кольчев В. А., Миронов К. А., Тыньанова И. И.* Общие закономерности рабочего процесса и их применение для расчета и анализа энергетических характеристик гидротурбин // Східно-Європейський журнал передових технологій. – Харків, 2006. – № 4/3 (22). – С. 54–64. 10. *Гнесин В. И., Дедков В. Н., Хорев О. Н.* Комплекс программ для расчета радиально-осевых рабочих колес гидромашин // Проблемы машиностроения. – Харьков, 2007. – Т. 10, № 2. – С. 9–14. 11. *Миронов К. А., Барлит В. В. и др.* Улучшение энергетических показателей рабочих колес гидротурбины РО500 при помощи численного моделирования течения в проточной части // Вісник Національного технічного університету “Харківський політехнічний інститут”. – Харків : НТУ “ХПІ”, 2004. – № 12. – С. 41-48. 12. *Барлит В. В., Бородаевский В. В.* Расчет и исследование новой серии высоконапорных радиально-осевых рабочих колес РО500 // Гидравлические машины. – Харьков, 1976. – Вып. 10. – С. 63–70. 13. *Terlinden R. W. G.* Practical use of model tests for the layout and selection of water turbines during stage of identification and/or preparation of feasibility studies // Water Power. – 2004. – P. 443–451. 14. *Топаж Г. И., Бусырев А. И.* Лопастные гидромашинны. Выбор основных параметров и элементов проточной части реактивных гидротурбин : учеб. пособие для студентов вузов. – С.-Петербург : гос. политехн. ун-т, 2007. – 123 с. 15. *Раухман Б. С.* Оценка и улучшение кавитационно-эрозийных показателей радиально-осевых гидротурбин с помощью гидродинамических методов // Тр. ЦКТИ. – Л., 1981. – Вып. 186. – С. 28–41. 16. *Барлит В. В., Бородаевский В. В., Яковлева Л. К.* Расчет обтекания решеток профилей лопастных систем гидромашин : учеб.-метод. пособие. – Харьков: НТУ “ХПИ”, 2005. – 56 с.

Поступила в редакцию 15.03.10