

Миронов К.А., Тыньянова И.И.

**МОДИФИКАЦИЯ ГЕОМЕТРИИ РАБОЧЕГО КОЛЕСА РО 500
НА ОСНОВАНИИ РАСЧЕТНЫХ ДАННЫХ CFD**

Совершенствование показателей проточных частей гидромашин различных типов в настоящее время основано на совместном применении численного моделирования течения в элементах проточной части и физического моделирования рабочего процесса на экспериментальных стендах. Особенно эффективно, как показывает практика ведущих гидромашиностроительных фирм [1,2], применение численного моделирования для модернизации ранее сооруженных ГЭС и ГАЭС, так как показатели их проточных частей, созданных 30–40 лет назад, существенно ниже современного уровня. Окончательную количественную оценку вероятных улучшений энергокавитационных показателей гидромашин могут дать только физические модельные испытания, точность которых при соблюдении требований Международной электротехнической комиссии [3] в настоящее время выше, чем точность расчетного моделирования.

Данная статья посвящена анализу результатов расчета трехмерного турбулентного течения жидкости и потерь энергии в проточной части гидротурбины РО 500, а также использованию полученных данных для оценки и совершенствования энергетических показателей. Расчет трехмерного течения выполнен с использованием коммерческого программного комплекса CFX TASCflow [4] в рамках научно-технического сотрудничества НТУ «ХПИ» с заводом тяжелого энергетического машиностроения ВНЕЛ (Индия). Используя программный комплекс CFX TASCflow, провели расчет вязкого трехмерного турбулентного течения жидкости, описываемого осредненными по Рейнольдсу уравнениями Навье–Стокса для модели турбулентности $k-\epsilon$, и наблюдали за визуализацией полученных данных с помощью постпроцессорного комплекса.

Расчет пространственного течения выполнен для проточной части высоконапорной гидротурбины на напор $H_{\max} = 530$ м, разработанной для условий ГЭС Каменг (Индия) с рабочим колесом (РК) РО 500-5Вт, спроектированным по методике и на основе комплекса прикладных программ (КПП), разработанного в НТУ «ХПИ» на кафедре гидромашин и описанной в [5,6].

На рис. 1 показано поле скоростей пространственного течения жидкости в области колонн статора, лопаток направляющего аппарата (НА) и лопастями РК, которое показывает не совсем благоприятный характер течения в расчетной области на оптимальном режиме. Расчетные величины осредненных потерь в основных элементах проточной части в оптимуме характеристики рассматриваемого варианта РК приведены в табл. 1.

Численное моделирование течения в проточной части гидротурбины РО 500-5 Вт проводилось для расчетной области, включающей межлопастной канал, образованный колоннами статора, лопатками НА, РК и отсасывающей трубой для модели с диаметром РК $D_1=500$ мм.

Полученные результаты расчета пространственного течения представлены в виде осредненных значений полного и статического давлений потока, осредненных углов потока в относительном и абсолютном движении и величин потерь в отдельных элементах проточной части. Для РК в режимной точке с минимальными суммарными потерями, близкой к оптимальной, получено поле статического и полного давлений в рас-

четной области, распределение компонентов меридиональной и окружной составляющих полной скорости перед входом в РК и на выходе из него, эпюры распределения давления для периферийного, среднего и втулочного сечений лопасти РК и траектории движения частиц жидкости в отсасывающей трубе.

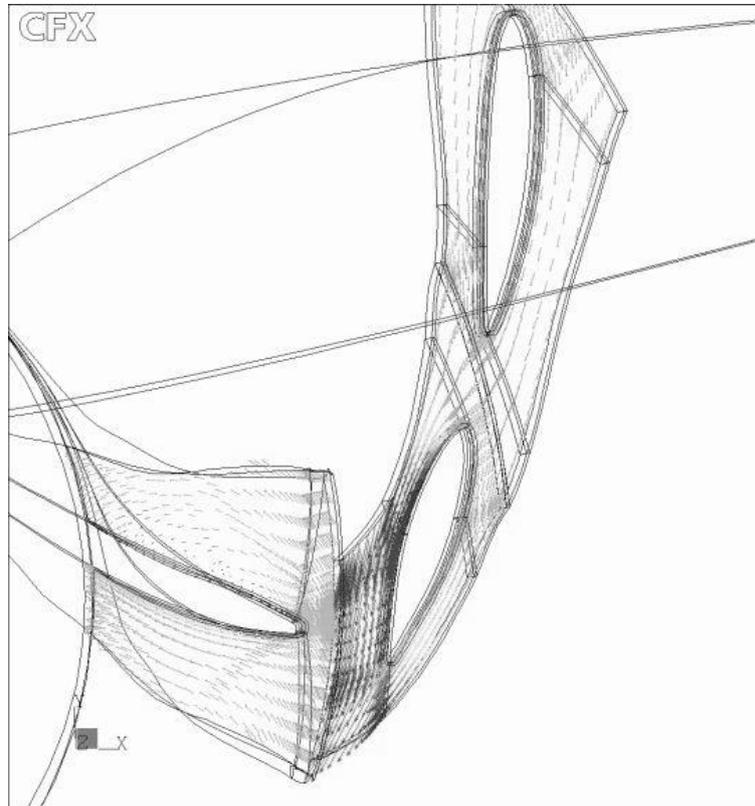


Рисунок 1 – Поле векторов скорости пространственного течения жидкости в области колонн статора, лопаток НА и РК на оптимальном режиме

Таблица 1 – Результаты расчета гидравлических потерь по пакету CFX TASCflow в оптимальных характеристиках проточной части

Тип РК	$n'_{i\dot{\omega}}$, мин ⁻¹	$Q'_{i\dot{\omega}}$, м ³ /с	Потери в подводе, $\bar{h}_{i\dot{\omega}}$, %	Потери в РК, $\bar{h}_{\delta\epsilon}$, %	Потери в отсасывающей трубе, $\bar{h}_{i\dot{\omega}}$, %	Суммарные потери, $\bar{h}_{\text{п\oт}}$, %
РО 500-5Вм	65	154	3,27	1,66	0,2	5,13

Полученные данные показывают, что геометрия лопастной системы РК в районе входной кромки не согласована с углом потока за НА, что означает наличие ударных потерь на входной кромке РК, поэтому в работе [6] была предложена модификация входного элемента лопасти, что привело к уменьшению суммарных потерь в РК РО 500-5Вм2 на 0,16% по сравнению с базовым вариантом (см. табл. 2). Однако базовое и модифицированное РК имеют завышенную частоту вращения РК $n'_l = 65 \text{ мин}^{-1}$, чем требует заказчик. С целью уменьшения частоты вращения и потерь в РК была предложена новая лопастная система РО 500-6В с нерадиальной выходной кромкой лопасти, на рис. 2 представлен план РК РО 500-5Вм и РО 500-6В, меридиональная проек-

ция осталась неизменной, входная кромка была принята такая же, как и у варианта РО 500–5Вм2, с целью учета неравномерности потока на входе в РК [6].

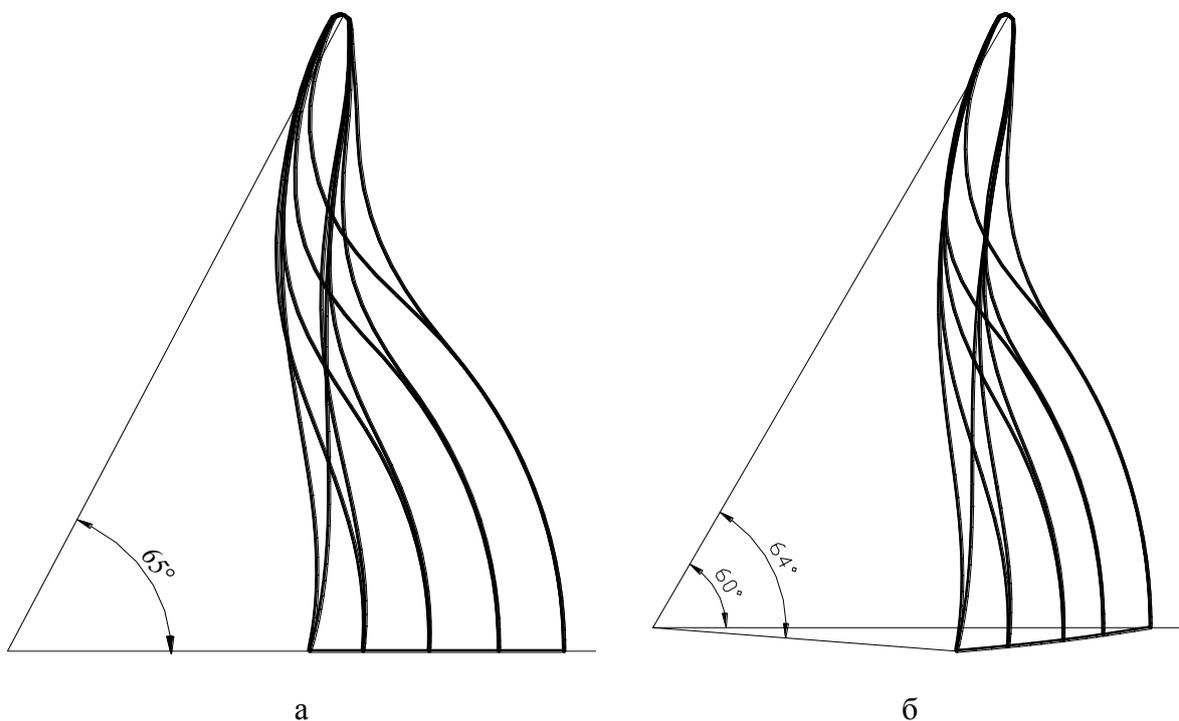


Рисунок 2 – План лопастной системы РК: а) РО 500-5Вм, б) РО 500-6В

На рис. 3 приведены траектории движения частиц жидкости от выходных кромок периферийного сечения РК до выходного сечения отсасывающей трубы для РК РО 500-5Вм.

Картина течения показывает упорядоченный характер течения в отсасывающей трубе с РК РО 500-5Вм (вторичные течения в отсасывающей трубе слабые). Это улучшает восстановление статического давления в отсасывающей трубе и не приводит к дополнительным потерям. Причиной благоприятного течения в периферийной области отсасывающей трубы является достаточная закрутка потока за РК, о чем свидетельствуют графики тангенциальной V_{u2} составляющей абсолютной скорости, приведенные на рис. 4.

Лопастная система РК РО 500-5Вм обеспечивает значительное возрастание величины тангенциальной составляющей скорости V_{u2} на периферийном участке лопасти, соответствующем $L = 0,8-1,0$, что приводит к более благоприятному течению в отсасывающей трубе.

Полученные расчетные данные соответствуют известным ранее экспериментальным рекомендациям о положительном влиянии небольшой закрутки потока на входе в отсасывающую трубу на величину потерь в ней [9] и об оптимальном, с точки зрения минимизации индуктивных потерь, характере распределения тангенциальной составляющей скорости с возрастанием ее значений в периферийной области [10].

Модификация лопастной системы РК РО 500-5Вм выполнена на основании анализа данных расчета трехмерного потока во всей проточной части гидротурбины и направлена на улучшение характера течения и уменьшения потерь на входе в РК. Так как значение приведенного расхода $Q'_{I\dot{\omega}}$ в оптимуме характеристики необходимо со-

хранить для удовлетворения требований, предъявляемых к натурной гидротурбине проектируемой ГЭС, модификации подвергнута геометрия входной части лопасти РК при сохранении формы остальной части лопасти неизменной. Модифицированная лопастная система РО 500-5Вм2 и новая лопастная система РО 500-6В рассчитана с использованием КПП, разработанного на кафедре гидромашин НТУ «ХПИ».

Успешное применение методики расчета и КПП иллюстрирует их использование для проектирования РК РО 500-5Вм.

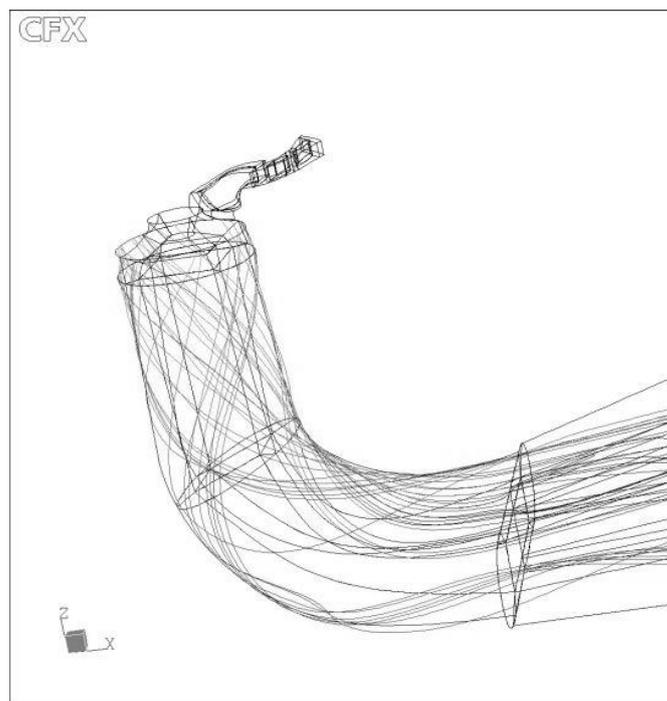


Рисунок 3 – Траектории движения частиц жидкости в отсасывающей трубе для периферийного сечения РК РО 500-5Вм на оптимальном режиме из расчета пространственного течения

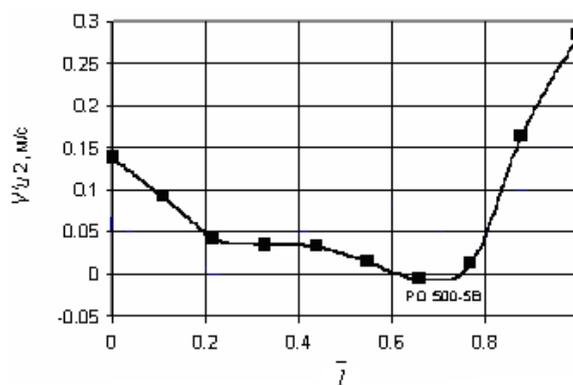


Рисунок 4 – Зависимости изменения тангенциальной составляющей скорости V_{u2} по размаху лопасти на выходе из РК на оптимальном режиме из расчета пространственного течения

В табл. 2 приведены результаты расчёта осредненных профильных $\bar{h}_{i\delta}$, циркуляционных \bar{h}_{δ} , ударных $\bar{h}_{\delta\ddot{a}}$ суммарных $\bar{h}_{\delta\ddot{a}i}$ потерь для исходного, модернизированного и нового РК в оптимальной точке характеристики проточной части.

Таблица 2 – Сравнение результатов расчета потерь в оптимуме характеристики РК по расчету ПРЗ

Тип р.к.	$\bar{h}_{i\delta}$, %	\bar{h}_δ , %	$\bar{h}_{\delta\alpha}$, %	$\bar{h}_{\delta\alpha i}$, %
РО 500-5Вм	1	0,383	0,3	1,683
РО 500-5Вм2	0,92	0,395	0,21	1,525
РО 500-6В	0,838	0,162	0	1

Таким образом, с учетом результатов работы [6,8], в которых получено хорошее совпадение результатов расчета потерь в подводе и РК РО 500-5Вм, определенных с помощью программного комплекса CFX TASCflow и КПП кафедры гидромашин НТУ «ХПИ»; анализа картины течения и расчета потерь в РК, выполненного в настоящей работе, можно прогнозировать улучшение энергетических показателей для проточной части гидротурбины РО 500 на величину 0,16 % за счет лучшего согласования параметров потока на входе в РК РО 500-5Вм2, при этом оптимальные приведенные величины для РК $Q'_I=152 \text{ м}^3/\text{с}$ $n'_I=66 \text{ мин}^{-1}$ по расчету ПРЗ.

Для РК РО 500-6В по результатам расчета ПРЗ получены оптимальные приведенные величины $Q'_I=158 \text{ м}^3/\text{с}$ $n'_I=62 \text{ мин}^{-1}$, что и требовалось заказчиком, при этом суммарные осредненные потери составляют 1 %, что на 0,68 % лучше базового варианта.

В результате применения коммерческого программного комплекса CFX TASCflow для расчета пространственного течения жидкости в проточной части высоконапорной гидротурбины РО 500 получены ранее отсутствовавшие данные о характере пространственного потока в расчетной области, величинах потерь в отдельных элементах и во всей проточной части, необходимые для дальнейшего совершенствования показателей проектируемых гидромашин.

Одним из условий достижения высоких энергокавитационных показателей гидротурбины является создание таких параметров пространственного потока на входе в РК, которые обеспечивают минимум ударных потерь, а на выходе из РК безотрывное течение жидкости в отсасывающей трубе и соответственно минимальную величину потерь во всей проточной части.

Необходимо изменить геометрию профиля лопатки НА, с целью уменьшения потерь в нем, т.к. суммарные потери на оптимальном режиме для спроектированного НА составляют 2,5% по результатам расчета CFX TASCflow.

Для проверки эффективности выполненной модернизации РК РО 500-6В, направленной на улучшение энергокавитационных показателей проточной части гидротурбины РО 500, необходимо провести расчет пространственного течения жидкости по программе CFX TASCflow, сопоставить полученные данные с РК РО 500– 5Вм и выбрать геометрию модели для экспериментальных исследований.

Литература

1. Sallaberger M. et. al. Accelerated design procedure for Francis runners in rehabilitation projects. // Hydropower & Dams Issue One. – 2001. – P. 87–92.
2. Masse B. et. al. Improving efficiency of a 195 MW Francis turbine using numerical simulation tools. // Proceedings of the 20th IAHR symposium of the section on hydraulic machinery, equipment and cavitations, Charlotte, 2000.
3. МЭК 60193. Модельные приемо-сдаточные испытания гидравлических турбин, насосов гидроаккумулирующих станций и насос-турбин. – 1999. – 567 с.

4. TASCflow User's Manual. Version 2.6, Advanced Scientific Computing Ltd., Waterloo, Ontario, Canada. – 1997.

5. Колычев В.А. и др. Применение безразмерных параметров для анализа рабочего процесса гидротурбин. // Вісник НТУ «ХПІ». Зб. наук. праць. Тематичний випуск «Енергетичні і теплотехнічні процеси і устаткування». – Харків: НТУ «ХПІ». – 2005. – № 28. – С. 79–88.

6. Миронов К.А. и др. Улучшение показателей рабочих колес гидротурбин РО 500 при помощи численного моделирования течения в проточной части // Вестн. НТУ «ХПІ», Харьков. – 2004. – № 12. – С. 41–48.

7. Турбины гидравлические вертикальные поворотные-лопастные, осевые и радиально-осевые. Типы, основные параметры и размеры. ОСТ 108.023.15–82.

8. Рао С. и др. Расчетное исследование пространственного турбулентного потока и потерь энергии в подводе гидротурбины РО 500 с использованием программ CFD // Вестн. НТУ «ХПІ», Харьков. – 2004. – № 12. – С. 83–90.

9. Этинберг И.Э., Раухман Б.С. Гидродинамика гидравлических турбин / Л.: Машиностроение, 1978. – 280 с.

10. Топаж Г.И. Условия проектирования РК гидротурбины с наименьшими индуктивными потерями // Энергомашиностроение. – 1976. – № 4. – С. 1–3.

УДК 621.224

Миронов К.А., Тиньянова І.І.

МОДИФІКАЦІЯ ГЕОМЕТРІЇ РОБОЧОГО КОЛЕСА РО 500 ЗА ДОПОМОГОЮ РОЗРАХУНКОВИХ ДАНИХ CFD

Виконано за допомогою комерційного програмного комплексу CFX TASCflow чисельне моделювання тривимірній в'язкій турбулентній течії в проточній частині радіально-осьової гідротурбіни РО 500, отримані дані по характеру течії і зміні втрат в основних елементах проточної частини. Аналіз отриманих даних дозволив запропонувати модифікацію лопаті робочого колеса РО 500-5Вт, що повинна поліпшити показники проточної частини за рахунок узгодження течії в підводі з робочим колесом і зменшення втрат у ньому, а також розробити нове робоче колесо з високими енергокавітаційними показниками.