

УДК 621.224

**А.В. РУСАНОВ, Ю.В. ГОРОДЕЦКИЙ, Д.Ю. КОСЬЯНОВ,
П.Н. СУХОРЕБРЫЙ, О.Н. ХОРЕВ**

Институт проблем машиностроения им. А.Н. Подгорного НАН Украины, Харьков

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ПРОТОЧНОЙ ЧАСТИ ОСЕВОЙ ПОВОРОТНО-ЛОПАСТНОЙ ГИДРОТУРБИНЫ

Представлены результаты расчетного исследования пространственного течения вязкой несжимаемой жидкости в проточной части вертикальной осевой поворотной-лопастной гидротурбины, разработанной на напор 20 м. Проточная часть включала трапецевидную спиральную камеру, направляющий аппарат, рабочее колесо и отсасывающую трубу. Моделирование течения проведено на основе численного интегрирования уравнений Рейнольдса с двухпараметрической моделью турбулентности Ментера (SST) с помощью программного комплекса FlowER-U. Выполнен анализ структуры потока во всех элементах проточной части.

Ключевые слова: гидротурбина, проточная часть, численное моделирование, вязкое течение.

Введение

В Украине большинство крупных гидроагрегатов ГЭС на р. Днепр, построенных в 50-60-х годах прошлого столетия, оснащены в основном вертикальными осевыми поворотными-лопастными (ПЛ) гидротурбинами и в настоящее время модернизируются. Из элементов проточной части замене подлежат рабочее колесо (р.к.) и направляющий аппарат (н.а.), а спиральная камера, статор и отсасывающая труба, являющиеся капитальными сооружениями, остаются неизменными. Модернизация считается экономически эффективной, если мощность модернизированного гидроагрегата увеличится не менее чем на 5%. Это возможно, прежде всего, за счет совершенствования лопастных систем заменяемых р.к. и н.а.

Течение жидкости в осевых ПЛ гидротурбинах имеет сложную пространственную структуру [1 – 4]. Поэтому для рационального проектирования новых или модернизируемых гидротурбин важно знать характеристики пространственного течения во всех элементах проточной части.

В работе представлены результаты численного исследования гидродинамических процессов в элементах проточной части ПЛ гидротурбины, разработанной на напор 20 м, выполненного с помощью программного комплекса FlowER-U.

1. Объект исследования

В качестве объекта исследования выбрана проточная часть номенклатурной гидротурбины ПЛ

20/811-B-50 [5], для которой известны геометрические данные проточной части и универсальная характеристика модели гидротурбины с $D_1 = 0,5$ м, полученная по результатам испытаний на гидродинамическом стенде. Расчетные исследования выполнялись для модели с диаметром р.к. $D_1 = 1$ м при напоре $H = 1$ м. Исследуемая проточная часть включала: спиральную камеру (с.к.) СУБ-0,43-210°, решетку симметричных профилей н.а. с числом лопаток $z_0 = 28$, высотой $b_0 = 0,43D_1$ и диаметром расположения осей поворота лопаток $D_0 = 1,2D_1$, р.к. ПЛ 20/811 с диаметром втулки $d_{вт} = 0,4D_1$, числом лопастей $z_1 = 4$ и отсасывающей трубы с коленом типа КУ-1ПЛ (рис. 1). Расчеты проведены для оптимального значения угла установки лопасти р.к. $\varphi_l = 16^\circ$ при четырех значениях открытия н.а. $a_0 = 55, 65, 75, 85$ мм и соответствующих им значениях приведенного расхода и оборотов, определенных по универсальной характеристике (табл. 1).

Таблица 1
Режимные параметры при расчетных исследованиях

Параметры	Режимы			
	1	2	3	4
a_0 , мм	55	65	75	85
Q_1 , л/с	1005	1170	1360	1580
n_1 , мин ⁻¹	122	147	175	209
КПД, %	90,5	92	90	82

Исследуемая проточная часть гидротурбины отображается на расчетную сетку с общим числом ячеек около 5,5 млн (рис. 1).

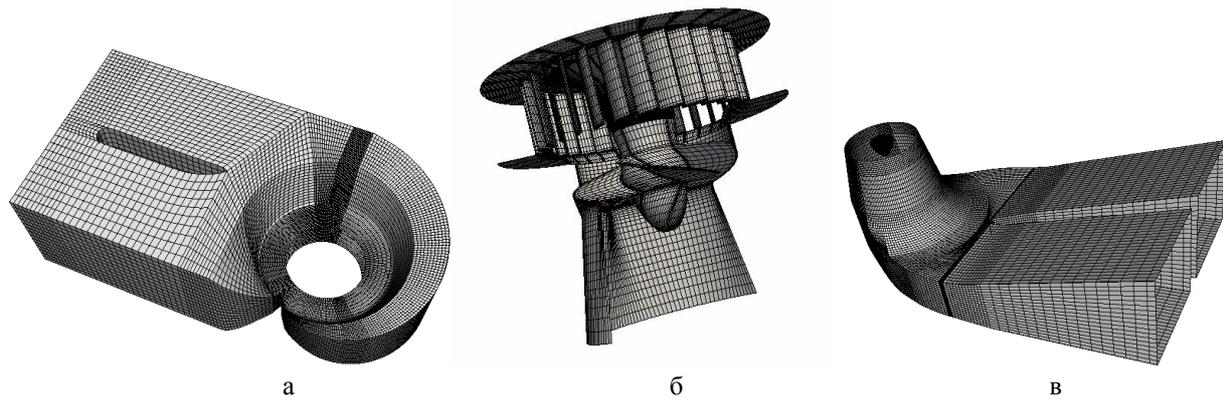


Рис. 1. Исследуемая проточная часть гидротурбины:
а – спиральная камера; б – решетки н.а. и р.к.; в – отсасывающая труба

2. Математическая модель. Численный метод

Моделирование течений вязкой несжимаемой жидкости в проточных частях гидротурбин выполняется на основе численного интегрирования уравнений Рейнольдса с дополнительным членом, содержащим искусственную сжимаемость [6].

Для учета турбулентных эффектов используется дифференциальная двухпараметрическая модель турбулентности Ментера (SST) [7].

Численное интегрирование уравнений проводится с помощью неявной квазимонотонной схемы Годунова второго порядка аппроксимации по пространству и времени. Подробное описание математической модели и численного метода представлено в работах [6, 8].

3. Результаты расчетного исследования течения

В результате расчетов получена структура пространственного потока в проточной части ПЛ гидротурбины для четырех режимов работы.

На рис. 2 представлено распределение абсолютной скорости и статического давления в спиральной камере для оптимального режима работы гидротурбины (режим 2, табл. 1).

Поток в спирали имеет сложную пространственную структуру. Величина абсолютной скорости V растет при приближении к колоннам статора и плавно уменьшается с увеличением угла охвата спирали. Максимальные ее значения наблюдаются вблизи колец статора, а к середине канала снижаются на 4 – 9%. Значения угла α , формируемого спиральной камерой, существенно зависят от угла охвата φ и значительно меняются по высоте канала. Угол α меняется от 40° при $\varphi = 0^\circ$ до 31° в районе $\varphi = 90^\circ$ и затем повышается до 35° . При угле $\varphi > 210^\circ$ угол α

уменьшается от 104 до 40° . Определение угла, формируемого спиральной камерой, является одной из важнейших задач при расчете потока, поскольку эта информация позволяет оптимально проектировать колонны статора. Сравнение полученных результатов с данными экспериментальных исследований [9] показывает их хорошее количественное и качественное согласование. Кроме того, величина осредненного угла потока $\bar{\alpha} = 33,5^\circ$ в диапазоне угла охвата спирали $\varphi = 0 - 210^\circ$ хорошо соответствует осредненному углу спиральной камеры, рекомендуемому ОСТ для с.к. СУБ-0,43-210° [5].

На рис. 3 представлены изолинии полной скорости V в области за н.а. для оптимального режима. Значения полной скорости и её составляющих, а также угол потока за лопатками н.а. $\alpha_{2\text{пот}}$ имеют меньшие значения в верхней части канала и возрастают к нижнему кольцу н.а. Наибольшее увеличение параметров потока наблюдается в области, составляющей примерно 20 % высоты канала, и связано с поворотом потока в проточной части. С увеличением открытия н.а. расходная составляющая скорости V_r и угол потока также возрастают, причем характер изменения по высоте канала не меняется, за исключением режима с наибольшим расходом.

На рис. 4 представлены изолинии полной скорости V в межлопастном канале р.к. в цилиндрическом сечении (радиус $R = 0,35$ м) для оптимального режима работы. Входная кромка обтекается с небольшим углом атаки, за выходной кромкой образуется след, который выравнивается с основным потоком на расстоянии, примерно равном трети хорды профиля.

Угол потока в относительном движении $\beta_{1\text{пот}}$ в области входных кромок р.к. отличается от лопастного угла $\beta_{1\text{лоп}}$, причем наибольшее отличие достигается у втулки. Для оптимального открытия н.а. и расхода большая часть лопасти (примерно 70%) обтекается с небольшими ($5 \div 7^\circ$) отрицательными

углами атаки. У втулки направление потока изменяется, появляются положительные углы атаки, которые увеличиваются при уменьшении открытия н.а. и расхода и достигают $30\div 40^\circ$. При увеличении отк-

рытия н.а. эпюра $\beta_{\text{пот}}$ выравнивается по ширине канала и лопасть обтекает с отрицательными углами атаки, не превышающими $8\div 10^\circ$.

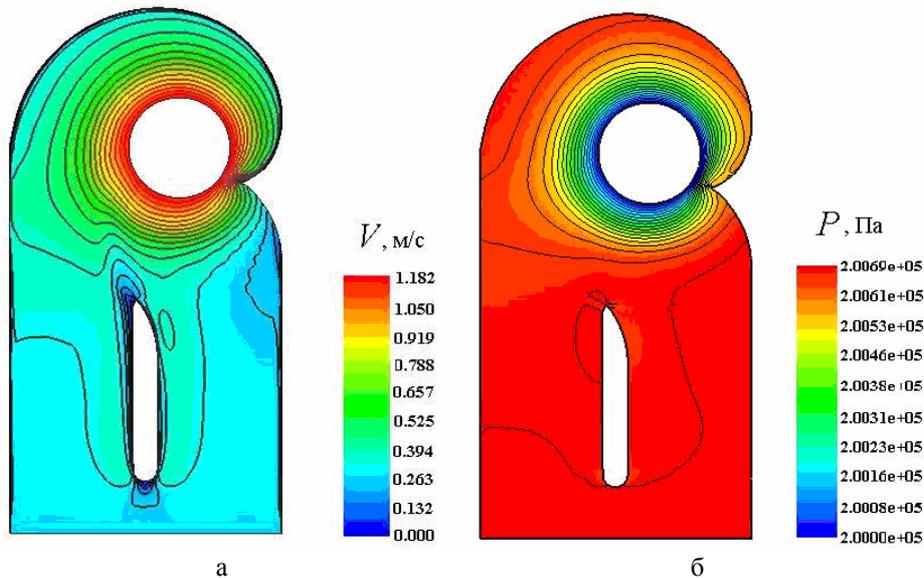


Рис. 2. Распределение абсолютной скорости V (а) и статического давления P (б) в спиральной камере

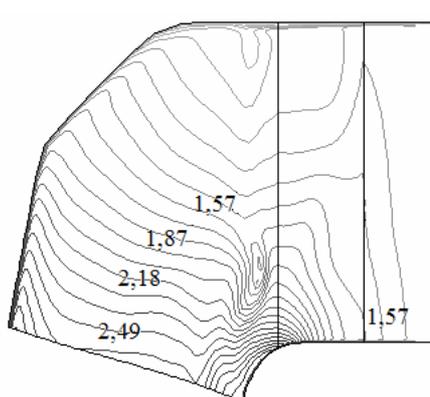


Рис. 3. Изолинии полной скорости в области за н.а.

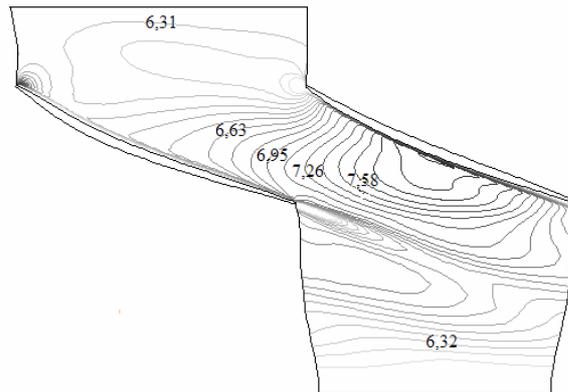


Рис. 4. Изолинии полной скорости в межлопастном канале р.к.

На рис. 5 показан отрыв потока и образование вихря в области входной кромки у втулки р.к. для режима с максимальным расходом (режим 4).

Поток за р.к. на входе в отсасывающую трубу имеет существенную закрутку по ширине канала, которая может принимать как отрицательные, так и положительные значения, в зависимости от режима работы.

Визуализация течения в отсасывающей трубе в виде изолиний полной скорости V для четырех режимов работы представлены на рис. 6. Неравномерность потока в отсасывающей трубе наблюдается по всей длине трубы, значительная часть которой занята потоком с малыми значениями скорости. Это связано с поворотом и расширением канала.

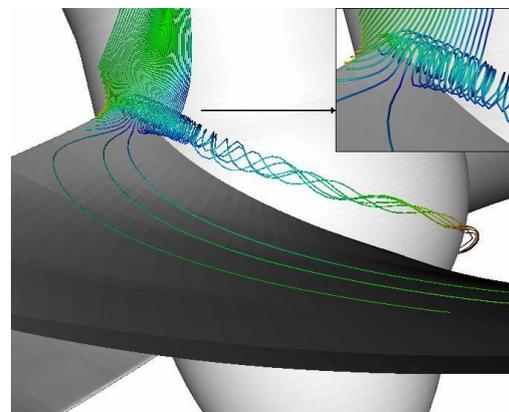


Рис. 5. Отрыв потока и образование вихря в области входной кромки у втулки р.к.

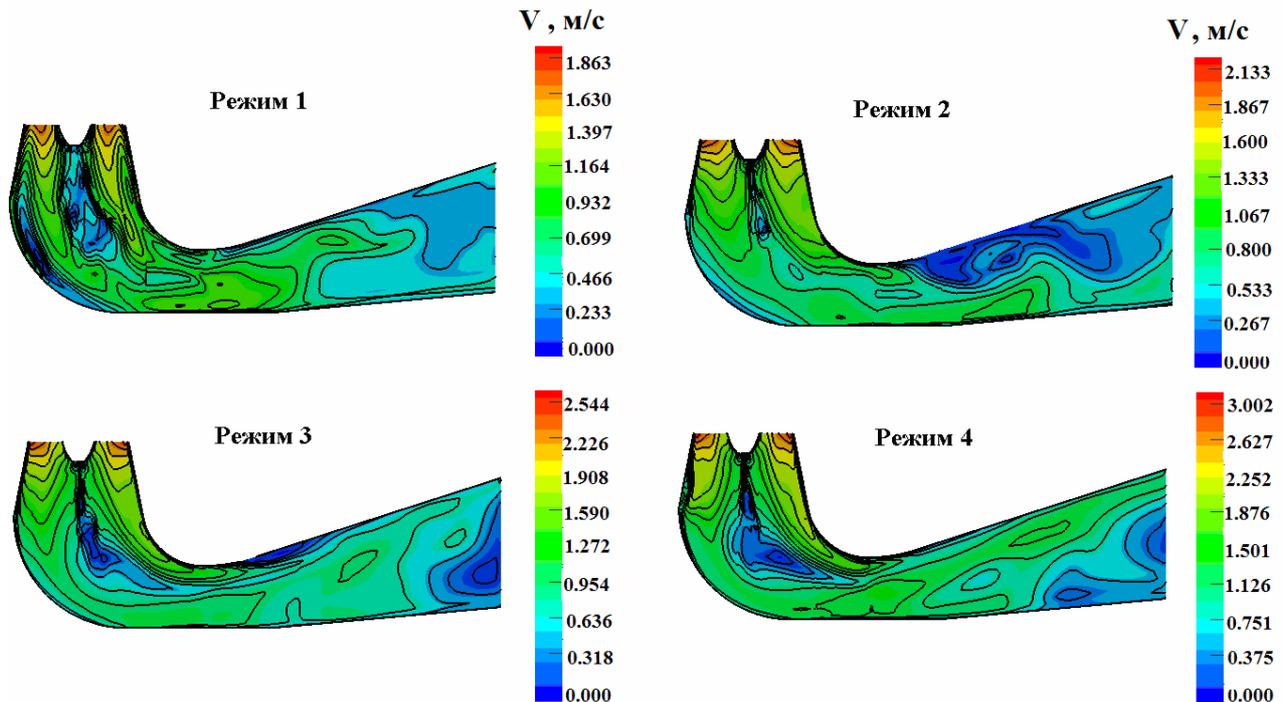


Рис. 6. Изолиний полной скорости V в отсасывающей трубе для четырех режимов

Заключение

Расчетное исследование трехмерного вязкого течения жидкости в проточной части вертикальной поворотной лопастной осевой гидротурбины позволило получить новые данные о структуре пространственного потока. Выполненный анализ течения жидкости в проточной части поворотной лопастной осевой гидротурбины и хорошее совпадение с известными экспериментальными исследованиями, позволяют сделать вывод о возможности использования программного комплекса *FlowER-U* для разработки новых и совершенствования существующих проточных частей гидротурбин.

Литература

1. Барлит В.В. *Гидравлические турбины* / В.В. Барлит. – К.: Вища шк., 1977. – 360 с.
2. Квятковский В.С. *Рабочий процесс осевой турбины. Ч.1. Тр. Всесоюз. ин-т гидр. машиностроения* / В.С. Квятковский. – М.: Машигиз, 1951. – 155 с.
3. Этинберг И.Э. *Теория и расчет проточной части поворотной лопастной гидротурбин* / И.Э. Этинберг. – Л.: Машиностроение, 1965. – 350 с.
4. *Исследование кинематики потока перед ра-*

бочим колесом и за ним поворотной лопастной осевой гидротурбины на напор 30-40 м / П.С. Завьялов, А.Е. Сушко, И.С. Веремеенко, А.В. Бондаренко, Н.А. Федоренко // *Гидравл. машины.* – X., 1977. – 11. – С. 39-44.

5. *ОСТ 108.023.15–82. Турбины гидравлические вертикальные поворотной лопастные осевые и радиально-осевые.* – Л., 1984. – 263 с.

6. Русанов А.В. *Численное моделирование течений вязкой несжимаемой жидкости с использованием неявной квазимонотонной схемы Годунова повышенной точности* / А.В. Русанов, Д.Ю. Косьянов // *Восточ.-Европ. журн. передовых технологий.* – 2009. – № 5. – С. 4-7.

7. Menter F.R. *Two-Equation Eddy-Viscosity Turbulence Models for Engineering Applications* / F.R. Menter // *AIAA J.* – 1994. – 32, № 8. – P. 1598-1605.

8. Русанов А.В. *Математическое моделирование нестационарных газодинамических процессов в проточных частях турбомашин* / А.В. Русанов, С.В. Еришов. – X.: Ин-т пробл. машиностроения НАН Украины, 2008. – 275 с.

9. Михайлов И.Е. *Турбинные камеры гидроэлектростанций* / И.Е. Михайлов. – М.: Энергия, 1970. – 272 с.

Поступила в редакцию 24.05.2011

Рецензент: д-р техн. наук, проф., зав. отделом В.И. Гнесин, Институт проблем машиностроения им. А.Н. Подгорного НАН Украины, Харьков, Украина.

**ЧИСЕЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ФІЗИЧНИХ ПРОЦЕСІВ У ПРОТОЧНІЙ ЧАСТИНІ
ОСЬОВОЇ ПОВОРОТНО-ЛОПАТЕВОЇ ГІДРОТУРБИНИ***А.В. Русанов, Ю.В. Городецький, Д.Ю. Косьянов, П.М. Сухоребрый, О.М. Хорєв*

Наведено результати розрахункового дослідження просторової течії в'язкої нестисливої рідини в проточній частині вертикальної осьової поворотно-лопатевої гідротурбіни, розробленої на напір 20 м. Проточна частина вміщувала спіральну камеру, направляючий апарат, робоче колесо та відсмоктувальну трубу. Моделювання течії виконано на основі чисельного інтегрування рівнянь Рейнольдса з двопараметричною моделлю турбулентності Ментера (SST) за допомогою програмного комплексу FlowER-U. Виконано аналіз структури потоку в усіх елементах проточної частини.

Ключові слова: гідротурбіна, проточна частина, чисельне моделювання, в'язка течія.

**NUMERICAL INVESTIGATION OF PHYSICAL PROCESSES
IN THE FLOW PART OF KAPLAN TURBINE***A.V. Rusanov, Yu.V. Gorodeckiy, D.Yu. Kosyanov, P.N. Souhorebry, O.N. Khoriev*

Presents the results of current studies of the spatial flow of viscous incompressible fluid flow in Kaplan turbine, designed by the pressure of 20 m. The flow-through part includes a spiral case, guide vanes, runner and draft tube. Modeling of flow was carried out on the basis of the numerical integration of the Reynolds equations with a two-parameter model of turbulence Menter (SST) using software of complex FlowER-U. The analysis of flow patterns in all parts of the flow part.

Key words: turbine, running part, numerical simulations, the viscous flow.

Русанов Андрей Викторович – д-р техн. наук, старший научный сотрудник, зам. директора по научной работе, заведующий отделом гидроаэромеханики энергетических машин Института проблем машиностроения им. А.Н. Подгорного НАН Украины, Харьков, Украина, e-mail: rusanov@ipmach.kharkov.ua.

Городецкий Юрий Владимирович – аспирант, Институт проблем машиностроения им. А.Н. Подгорного НАН Украины, Харьков, Украина.

Косьянов Дмитрий Юрьевич – аспирант, ведущий инженер, Национальный технический университет «ХПИ», Институт проблем машиностроения им. А.Н. Подгорного НАН Украины, Харьков, Украина.

Сухоребрый Петр Николаевич – канд. техн. наук, старший научный сотрудник отдела гидроаэромеханики энергетических машин Института проблем машиностроения им. А.Н. Подгорного НАН Украины, старший научный сотрудник, Харьков, Украина, e-mail: suhor@ipmach.kharkov.ua.

Хорєв Олег Николаевич – канд. техн. наук, научный сотрудник отдела гидроаэромеханики энергетических машин Института проблем машиностроения им. А.Н. Подгорного НАН Украины, Харьков, Украина, e-mail: khorev@ipmach.kharkov.ua.