

Н. Г. ШЕВЧЕНКО, А. М. ГРИШИН, Е. С. КОВАЛЬ

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕЧЕНИЯ ЖИДКОСТИ В ЗОНЕ «СПИРАЛЬ – СТАТОР» ГИДРОТУРБИНЫ РО 310 С ПЛОСКИМИ КОЛЬЦАМИ СТАТОРА

Рассматривается один из ответственных узлов гидроагрегата – узел «спиральная камера – статор». Статор гидротурбины является подводящим элементом проточного тракта гидротурбины, который участвует в формировании потока перед рабочим колесом. В работе рассмотрена конструкция статора с плоскими кольцами, колонны которых вдвинуты в спиральную камеру. Такая конструкция статора позволяет сохранить основные габаритные размеры спирали в плане для гидротурбин с встроенным кольцевым затвором. Информационный анализ показал, что наряду с конструктивными и технологическими преимуществами, применение колец статора колонны, которые вдвинуты в спиральную камеру, имеют гидродинамические недостатки. При рассматриваемой конструкции узла «спираль – статор с плоскими кольцами», деформируется эпюра меридиональной составляющей скорости. В итоге могут увеличиться потери энергии, связанные с отрывом потока и вторичными течениями в спиральной камере. Представлены гидродинамические исследования структуры потока в зоне спираль статор с плоскими кольцами – экспериментальные и численные расчеты. Предлагается для исследования формы колец статора провести расчет осесимметричного течения в ограниченной расчетной зоне «спираль – статор» гидротурбины с использованием двухслойной модели движения вязкой жидкости. Приведены экспериментальные данные замера давления на поверхности колец статора. Сопоставление расчетных и экспериментальных данных дает качественное совпадение. Для трех вариантов колец статора в работе проведен расчет пограничного слоя. Результаты показали, что максимальное загромождение пограничного слоя канала статора достигает 5,2 %. Для исследуемых вариантов колец статора местного отрыва пограничного слоя не наблюдается. Проведены расчеты профильных и ударных потерь в решетке колонн статора для исследуемой конструкции подвода гидротурбины.

Ключевые слова: гидротурбина радиально-осевая, спиральная камера, плоские кольца статора, математическая постановка, вязкая жидкость, двухслойная модель, пограничный слой, экспериментальные и численные исследования.

Н. Г. ШЕВЧЕНКО, О. М. ГРИШИН, О. С. КОВАЛЬ

ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕЧІЇ РІДИНИ В ЗОНІ «СПІРАЛЬ – СТАТОР» ГІДРОТУРБИНИ РО 310 З ПЛОСКИМИ КІЛЬЦЯМИ СТАТОРА

Розглядається один з відповідальних вузлів гідроагрегату – вузол «спіральна камера – статор». Статор гідротурбіни є подводящим елементом проточного тракту гідротурбіни, який бере участь у формуванні потоку перед робочим колесом. В роботі розглянута конструкція статора з плоскими кільцями, колони яких всунути в спіральну камеру. Така конструкція статора дозволяє зберегти основні габаритні розміри спіралі в плані для гідротурбін з вбудованим кільцевим затвором. Інформаційний аналіз показав, що поряд з конструктивними і технологічними перевагами, застосування статора, колони якого всунути в спіральну камеру, мають гідродинамічні недоліки. При даній конструкції вузла «спіраль – статор», деформується епюра меридіональної складової швидкості. В результаті можуть збільшитися втрати енергії, пов'язані з відривом потоку і вторинними течіями в спіральній камері. Представлені гідродинамічні дослідження структури потоку в зоні спіраль –статор з плоскими кільцями – експериментальні та чисельні розрахунки. Пропонується для дослідження форми кілець статора провести розрахунок осесимметричного течія в обмеженому розрахунковій зоні «спіраль – статор» гідротурбіни з використанням двохшарової моделі руху в'язкої рідини. Наведено експериментальні дані виміру тиску на поверхні кілець статора. Зіставлення розрахункових і експериментальних даних дає якісне збіг. Для трьох варіантів кілець статора в роботі проведено розрахунок прикордонного шару. Результати показали, що максимальне захащення прикордонного шару каналу статора досягає 5,2 %. Для досліджуваних варіантів кілець місцевого відриву прикордонного шару не спостерігається. Проведено розрахунок обтікання решітки профілів колон статора на осьосиметричній поверхні струму з подальшим визначенням профілів і ударних втрат.

Ключові слова: гідротурбіна радіально-осьова, спіральна камера, плоскі кільця статора, математична постановка, в'язка рідина, двохшарова модель, пограничний шар, експериментальні та чисельні дослідження.

N. G. SHEVCHENKO, A. M. GRISHIN, E. S. KOVAL

STUDY OF LIQUID FLOW IN THE "SPIRAL – STATOR" AREA FRANCIS TURBINE WITH STATOR FLAT RINGS

Considered one of the critical units of the Francis turbine – node "spiral chamber – stator". The turbine stator is the supply element of the flow path of the turbine, which is involved in the formation of flow in front of the impeller. In this paper, the design of the stator with flat rings, the columns of which are pushed into the spiral chamber, is considered. This design of the stator allows you to save the main dimensions of the spiral in the plan for hydraulic turbines with built-in ring gate. Information analysis showed that, along with constructive and technological advantages, the use of stator rings of the column, which are pushed into the spiral chamber, have hydrodynamic disadvantages. Under the considered design of the "spiral – stator with flat rings" assembly, the plot of the meridional velocity component is deformed. As a result, the energy losses associated with flow separation and secondary flows in the spiral chamber can increase. Hydrodynamic studies of the flow structure in the "spiral – stator" zone with flat stator rings are presented – experimental and numerical calculations. It is proposed to study the shape of the stator rings to calculate the axisymmetric flow in the limited "spiral – stator" calculation zone of the turbine using a two-layer model of viscous fluid motion. The experimental data of pressure measurement on the surface of the stator rings are given. Comparison of calculated and experimental data gives a qualitative match. For three variants of stator rings, the boundary layer was calculated in the work. The results showed that the maximum blockage of the stator channel boundary layer reaches 5,2 %. The calculation of the turbulent boundary layer showed that for the studied variants of the rings of local boundary layer separation is not observed. The calculation of the flow around a lattice of stator column profiles on an axisymmetric current surface with the subsequent determination of the profile and impact losses was carried out. The proposed improvement of the method of calculation.

Keywords: Francis turbine, spiral chamber, flat stator rings, mathematical formulation, viscous fluid, two-layer model, boundary layer, experimental and numerical studies.

Введение. На современном этапе развития гидромашиностроения одной из основных проблем является повышения общей рентабельности и надежности эксплуатации гидромашин при сохранении ее высоких энергокавитационных качеств [1]. Поэтому в настоящее время стоит задача повышения эффективности гидротурбинного оборудования применением гидромашин новых типов и конструкций. Одним из весьма ответственных металлоемких и трудоемких узлов гидроагрегата является узел «спиральная камера – статор». Статор турбины – несущая деталь, передающая на фундамент нагрузку от массы агрегата и осевого давления воды. Кроме того, будучи элементом проточного тракта, статор участвует в формировании потока перед рабочим колесом.

Существуют два основных варианта конструктивного исполнения статора: классическое – с тороидальными статорными кольцами; статор типа «UBEL» – отличительной особенностью его исполнения это плоские или конические кольца. Приварку деталей крышки и спиральной камеры к статору конструкции типа UBEL производят с возможным приближением этих деталей к центру колонн, так чтобы свести к минимуму изгибающий момент, действующий на статор [2–6]. Также известно, что применение статора с плоскими (коническими) кольцами, колонны которых вдвинуты в спиральную камеру, позволяет сохранить основные габаритные размеры спирали в плане для гидромашин со встроенным кольцевым затвором [1, 7–9].

На рис. 1 представлены два варианта подвода: B-0 – классический вариант радиально-осевой (РО) гидротурбины с тороидальными статорными кольцами; B-1 – модификация конструкции подвода с плоскими кольцами статора и встроенным кольцевым затвором.

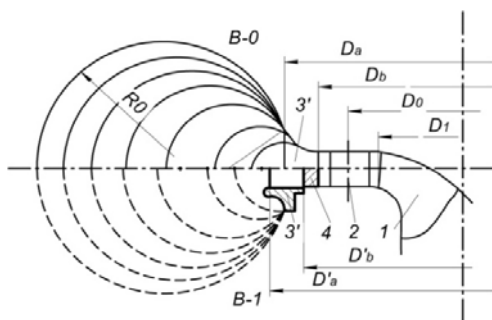


Рис. 1. Узел гидротурбины «спиральная камера – статор»:

- 1 – рабочее колесо; 2 – направляющий аппарат;
- 3 – кольцевой затвор; 4, 5 – колонны статора;
- 6 – плоские кольца статора

В настоящее время для оценки течения и потерь в каналах гидромашин хорошо зарекомендовали себя двумерные методы, которые требуют небольшого времени на их реализацию по сравнению с трехмерными методами и которые дают удовлетворяющие практике результаты [10–11]. На завершающем этапе проектирования и оценки

энергокавитационных качеств насосов используют трехмерные методы [12]. Применение математических моделей дает возможность вести процесс многовариантного проектирования с оценкой качеств элементов гидромашин и выбором оптимального варианта на стадии проектирования. Поэтому расчет элементов проточных частей гидромашин с применением методов математического моделирования является актуальной.

Информационный обзор. Изучение узла «спираль – статор» радиально-осевой гидротурбины проводится по двум основным направлениям – исследование напряженно-деформированного состояния [5], анализ спектра частот пульсации давления [6], а так же гидродинамические исследования структуры потока [7, 8].

В данной работе рассмотрены вопросы гидродинамических исследований структуры потока и формы колец статора радиально-осевой гидромашин. Результаты экспериментальных исследований структуры потока в зоне «спиральная камера – статор с плоскими кольцами» были представлены в следующих работах: для гидротурбины РО 310 [8], для обратимых машин ($n_s = 190$) [7]. Анализ результатов этих экспериментальных работ показал, что структура потока в области «спираль – статор» носит пространственный вихревой характер. Во всех исследуемых моделях во втором сечении ($\varphi = 305^\circ$) спирали наблюдается «парный вихрь». Однако для варианта статора с плоскими кольцами интенсивность его несколько меньше. Отмечено, что установка плоских колец статора трансформирует поток в спирали, по сравнению с базовым вариантом. Значения скорости V_r в зоне спирали вблизи входных кромок колец статора возрастают в центре сечения – увеличивается неравномерность ее распределения по сечению канала.

На рис. 2 приведены эпюры скорости V_r ($H = 1$ м, $D_1 = 1$ м) в двух наиболее характерных сечениях спирали: 2-2 ($\varphi = 305^\circ$) и 7-7 ($\varphi = 80^\circ$). В зоне статора для большинства сечений спирали ($\varphi = 305^\circ - 80^\circ$) неравномерность окружной и радиальной составляющей абсолютной скорости при установке плоских колец уменьшается.

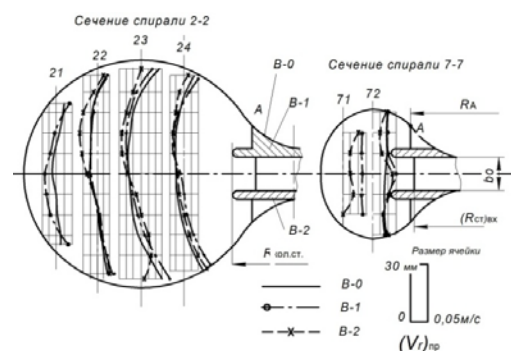


Рис. 2. Эпюры скорости V_r в сечениях спирали для трех вариантов исполнения колец статора [10]

Для сечений вблизи зуба спирали неравномерность существенно увеличивается, что объясняется существенным загромаждением «живого» сечения спирали кольцами статора.

Анализ показал, что наряду с конструктивными и технологическими преимуществами, применение колец статора колонны, которых вдвинуты в спиральную камеру, имеют гидродинамические недостатки. При рассматриваемой конструкции узла «спираль – статор с плоскими кольцами», деформируется эпюра меридиональной составляющей скорости в области сопряжения статора и спирали. В итоге могут увеличиться потери энергии, связанные с отрывом потока и вторичными течениями в спиральной камере.

Исследование узла «спираль – статор» для различных вариантов установки колец статора, их формы, густоты решетки статора, наличие кольцевого затвора в серии модельных испытаний являются чрезвычайно дорогостоящими и трудоемкими. Поэтому на стадии проектирования целесообразно использовать численные методы для определения оптимальной конструкции проточной части гидромашин. Следует обратить внимание на работы [13–17], где представлены численные расчеты трехмерного турбулентного течения вязкой жидкости в подводе «спираль – статор» гидротурбины.

В работах [18, 19] описывается влияние закономерностей структуры потока в проточной части высоконапорной РО гидротурбины на особенности математического моделирования. Обосновывается допущение расчета в высоконапорных гидротурбинах двухслойной модели потока. В этой модели основной поток рассматривается, как потенциальный поток невязкой жидкости с последующим расчетом течения в пограничном турбулентном вязком слое. Такое упрощение модели потока позволяет получить достаточно достоверные результаты, относительно потерь энергии на трение.

Постановка задачи. Как показывают экспериментальные исследования, поток в зоне «спираль – статор» носит трехмерный вихревой характер. Поэтому, желательно было бы, рассматривать нестационарную постановку турбулентного движения вязкой жидкости во всем проточном тракте гидротурбины в 3-х мерной постановке.

Однако в данной работе на предварительном этапе исследований предлагается провести расчет осесимметричного течения в ограниченной расчетной зоне «спираль – статор» гидротурбины с использованием двухслойной модели движения жидкости. Принята следующая схематизация потока: 1 – ядро потока, где анализ ведется с позиций невязкой жидкости; 2 – зона пограничного вязкого слоя (ПС) на статорном кольце с возможными локальными отрывами. Численное решение этих задач входит в программный комплекс, разработанный авторами, и не требует длительных расчетных операций, что существенно упрощает исследования объекта. В работе представлены результаты

экспериментальных и расчетных исследований в проточной части в зоне «спираль – статор с плоскими кольцами» для гидротурбины РО 310 со встроенным кольцевым затвором.

Численная реализация. При решении первой задачи двухслойной модели движения жидкости предполагаем, что поток, формируемый спиральной камерой радиально-осевой турбины потенциальный, однородный в окружном направлении. Суммарный осесимметричный поток в зоне «спираль – статор» раскладывается на циркуляционный \vec{V}_u и меридиональный $\vec{V}_m = \vec{V}_r + \vec{V}_z$. Осесимметричный меридиональный поток решается с использованием функции тока ψ , удовлетворяющей уравнению Лапласа $\Delta\psi = 0$. В цилиндрической системе координат (r, z) расчетное выражение для функции тока ψ имеет вид:

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \psi}{\partial r} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2} = 0. \quad (1)$$

Составляющие меридиональной скорости V_r, V_z определяются из уравнения задания функции тока:

$$V_z = -\frac{1}{r} \frac{\partial \psi}{\partial z}; \quad V_r = \frac{1}{r} \frac{\partial \psi}{\partial r}. \quad (2)$$

Решение уравнений (1) и (2) осуществляется методом конечных разностей с использованием неравномерной сетки в расчетной области [5].

Формула для расчета коэффициента давления имеет вид:

$$\bar{p}_{i,j} = \frac{P_{i,j}}{\gamma H} = 1 - \frac{V_{i,j}^2}{2gH}, \quad (3)$$

где i – индекс-идентификатор линии тока; j – индекс сечения; $V_{i,j}$ – скорость в расчетной точке, $\vec{V} = \vec{V}_m + \vec{V}_u$.

При решении второй задачи – расчета обтекания колец статора с учетом вязкости, использовались обширные исследования Лойцянского Л. Г., Федяевского К. К., Pletcher R., предложивших метод расчета турбулентного пограничного слоя, основанный на применении полуэмпирических теорий турбулентности. В неподвижных каналах гидромашин развитие пограничного слоя зависит от продольного градиента давления. Принято допущение, что толщина пограничного слоя, формируемая на поверхности спиральной камеры, значительно меньше длины выступающей части колец статора в спирали. В этом случае пограничный слой развивается в области положительного градиента давления на поверхности плоских статорных колец. Определение параметров пограничного слоя вдоль рассматриваемых поверхностей позволяет определить следующие величины: δ^{**} – толщину потери импульса; C_f –

коэффициент сопротивления; потери на трение $h_{тр} = \left(\frac{V^2}{2g}\right) \cdot C_f \cdot L$; наличие локальных зон отрыва пограничного слоя. Методика расчета и алгоритм решения задачи представлены в работах [20, 21].

Результаты исследований. Для условий модельной гидротурбины РО 310 ($D_1 = 400$ мм) в соответствии с техническим заданием [8] рассмотрены три варианта формы статора: B-0 – тороидальные кольца статора; B-1, B-2 – плоские кольца статора (диаметр установки $D_k = 878$ мм). Варианты расчетной области представлены на рис. 2.

На рис. 3 сопоставлены расчетные и экспериментальные данные. Характер распределения этих величин качественно совпадает.

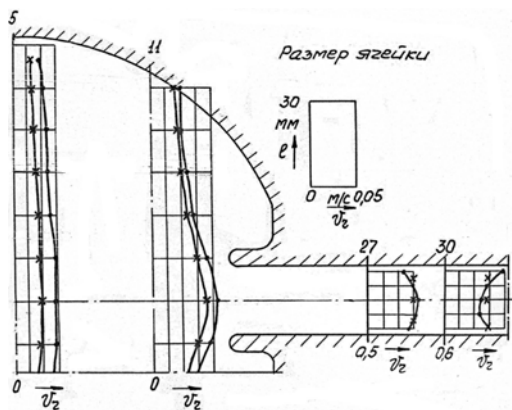


Рис. 3. Распределение радиальной составляющей скорости V_r в расчетной зоне «спираль – статор»

На рис. 4 представлено сопоставление расчетных значений угла потока δ по высоте канала статора для двух вариантов исполнения статорных колец.

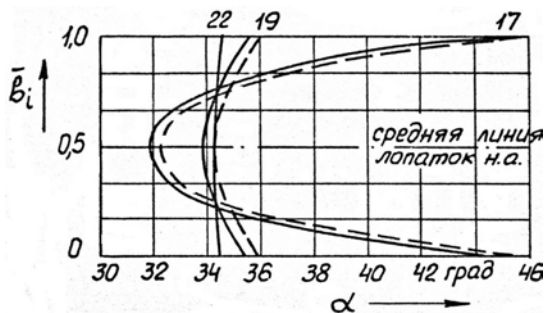


Рис. 4. Сопоставление распределения угла потока α по высоте канала для двух вариантов колец статора

С целью проверки достоверности расчетных величин давления по поверхности колец статора на аэростенде кафедры гидромашин НТУ «ХПИ» были проведены экспериментальные исследования [5]. Экспериментальные исследования проводились при режиме: $Q = 0,5$ м³/с, $n = 62$ мин⁻¹, $H = 150$ м возд. ст. Показания распределения давления вдоль поверхности колец статора снимались с батарейного манометра с общим коллектором, который имеет 53 трубки.

На рис. 5 представлена схема расположения мерных сечений на плоскости кольца статора (B-2).

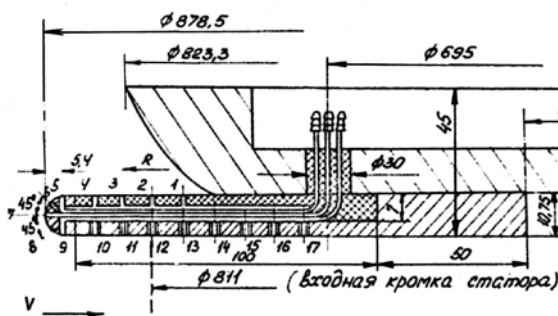


Рис. 5. Схема расположения мерных сечений на плоскости кольца статора (B-2) [5]

На рис. 6 представлено сопоставление зависимостей распределения коэффициента давления вдоль статорного кольца, полученных экспериментально и по расчету. Дренаживание плоского кольца статора было выполнено в сечении спирали 2-2 ($\varphi = 305^\circ$) – где интенсивность «парного вихря» максимальная, и в сечении спирали 7-7 ($\varphi = 70^\circ$) – где структура потока существенно отличается от структуры потока сечения 2-2 – (см. рис. 2). При повороте потока вокруг входной кромки кольца статора $\bar{L} = 0,4 - 0,43$ наблюдается резкое изменение коэффициента давления. Безразмерная величина $\bar{L} = 0,43$ соответствует точке 7 – рис. 6. Сравнение расчетных и экспериментально полученных величин коэффициента давления \bar{p} вдоль поверхности кольца статора (для расчетного сечения $\varphi = 305^\circ$) показывает удовлетворительное качественное и количественное их соответствие.

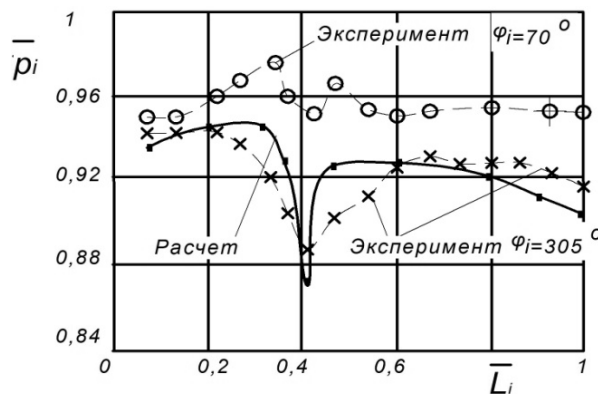


Рис. 6. Сравнение расчетной и экспериментальной зависимостей распределения коэффициента давления вдоль статорного кольца

Для трех вариантов колец статора в работе проведен расчет пограничного слоя. Результаты показали, что максимальное загромождение ПС канала статора достигает 5,2 % для сечений вблизи зуба $\varphi = 70^\circ$. Максимальное значение величины потерь на трение достигает 0,05 % от расчетного напора для сечения спирали $\varphi = 305^\circ$. Расчет турбулентного пограничного слоя вдоль исследуемых вариантов колец показал, что местного отрыва ПС не наблюдается.

Авторами проведен расчет обтекания решетки профилей колонн статора ($z = 12$) на осесимметричной поверхности тока с последующим определением профильных и ударных потерь в решетке колонн статора. Расчеты показали, что для варианта В-1 профильные и ударные потери (в зоне статора) являются минимальными и составляют 1,3 % и 0,08 %, соответственно.

Установлено, что существенное значение на гидродинамику потока в зоне «спираль – статор» оказывают радиус установки колец – R_k и колонн статора – $(r_{ст})_{вх.}$, а также радиус закругления входной кромки кольца статора – r_1 . Предложенная упрощенная методика позволяет провести сравнительный анализ различных вариантов исполнения статорных колец.

Выводы. Поток в зоне «спираль – статор» носит трехмерный вихревой характер. На структуру потока в спирали и статоре плоские кольца статора влияют неоднозначно. Влияние колец статора, вдвинутых в спиральную камеру (В-1 и В-2), больше распространяется на формирование потока в самой спирали, чем в каналах статора. На радиусе расположения входных кромок колонн статора поток выравнивается.

Для полного комплекса расчетных работ при выборе оптимальной геометрии спиральной камеры, колец статора и профилей колонн статора необходимо совместное решение двух задач.

Первая задача – гидромеханический расчет спиральной камеры, т.е. определение размеров спирали для различных вариантов исполнения колец статора и способов сопряжения статора со спиралью при рекомендуемых законах распределения скорости и расхода.

Вторая задача – численное моделирование трехмерного течения вязкой турбулентной жидкости в зоне «спираль – статор – направляющий аппарат».

Список литературы

1. Линник А. В., Хаитов В. Д. Современный уровень и основные направления развития гидротурбостроения в Украине. *Проблемы машиностроения*. 2010. Т. 13, № 1. С. 11–18.
2. Hermod Brekke. *Hydraulic Turbines Design, Erection and Operation*. Endringsdato: Norway, 2000. 317 p.
3. *Мирэа. Федеральный каталог*. МГУ, 2007. 35 с.
4. Challenges in the Design of Pump Turbines. *AndritzHydro CO. USA*, November 2012. 24 p.
5. Веремеенко И. С., Кантор Б. Я., Медковская Т. Ф., Ржевская И. Е., Андрущенко С. А. Исследование напряженно-деформированного состояния и оптимизация элементов конструкции проточного тракта гидротурбин. *Авиационно-космическая техника и технология*. 2006. № 8 (34). С. 104–108.
6. Xuanlin Peng, Jianzhong Zhou, Chu Zhang, Ruhai Li, Yanhe Xu, Diyi Chen. An Intelligent Optimization Method for Vortex-Induced Vibration Reducing and Performance Improving in a Large Francis Turbine. *Energies*. 2017. № 10. P. 1–17. doi:10.3390/en10111901.
7. Федулов Ю. И., Сухорезький П. Н., Агибалов Е. С. Исследование проточной части обратимой гидромашини с плоскими кольцами статора и установкой кольцевого затвора. *Вестник Харьковского политехнического института: сб. науч. тр.* Харьков: Вища школа, 1988. Вып. 22: Гидравлические машины. С. 17–20.
8. *Исследование элементов проточных частей Рогунской ГЭС, Днестровской ГАЭС и др. ГЭС и АЭС. Отчет о НИИ. № ГР 01870000*. Харьков: НТУ «ХПИ», 2000. 120 с.

9. Черный С. Г., Авдюшенко А. Ю., Чирков Д. В. Численная модель течения в гидротурбине с затвором. *Вестник Восточно-Казахстанского гос. техн. ун-та им. Д. Серикбаева: сб. науч. тр. Темат. вып.: Вычислительные технологии*. Усть-Каменогорск. 2013. С. 266–274.
10. Топаж Г. И. *Лопастные гидромашини и гидродинамические передачи. Основы рабочего процесса гидротурбин*. Санкт-Петербург: Изд-во Политехн. Университет, 2011. 154 с.
11. Пугачев П. В., Алексенский В. А., Жарковский А. А. Расчетное исследование потерь в направляющих аппаратах канального и решеточного типов. *Насосы & оборудование*. 2011. № 1. С. 44–66.
12. Blazek Jiri. *Computational Fluid Dynamics: Principles and Applications*. Waltham: Helsevier, 2015. 440 p.
13. Jaymin Desai, Amit Roghelia, Vishal A Soni. Validation of Hydraulic Design of Spiral Casing and Stay Vanes of Francis Turbine Using CFD. *Conference Paper (16-18 December 2010, Chennai, India)*.
14. Susan-Resiga R. F., Muntean S., Avellan F., Anton I. Mathematical modelling of swirling flow in hydraulic turbines for the full operating range. *Applied Mathematical Modelling*. 2011. No. 35. P. 4759–4773.
15. Ganesh Chembedu, Alleiah Sunkara, Mayank Srivastava. Automizing the Design of Francis Turbine Spiral Case. *International Journal of Advanced Mechanical Engineering*. Vol. 4, № 5 (2014). P. 463–472.
16. Сухорезький П. Н., Меньшикова Л. Л., Барлит В. В., Дранковский В. Э., Эскрибано Е. М. Оптимизация подвода радиально-осевых высоконапорных гидротурбин на основе численного исследования кинематических характеристик и потерь энергии. *Проблемы машиностроения*. 2003. Т. 2. С. 590–594.
17. Drankovsky V. E., Rezvaya K. S., Krupa E. S. Calculating three-dimensional fluid flow in the spiral casing of the reversible hydraulic machine in turbine mode. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Hydraulic machines and hydraulic units*. Kharkiv: NTU "KhPI". 2016. No. 20 (1192). P. 53–57.
18. Потетенко О. В., Шевченко Н. Г., Радченко Л. Р. Влияние закономерностей структуры потока в проточной части высоконапорной РО гидротурбины на особенности математического моделирования. *Вестник Нац. техн. ун-та «ХПИ»: сб. науч. тр. Темат. вып.: Энергетические и теплотехнические процессы и оборудование*. Харьков: НТУ «ХПИ». 2003. № 10. С. 130–143.
19. Потетенко О. В., Дранковский В. Э., Крупа Е. С. Вихревая структура потока и анализ различных математических моделей потока в каналах высоконапорных радиально-осевых гидротурбин РО 400, РО 500 и РО 600. *Східно-Європейський журнал передових технологій*. 2012. № 318 (57). С. 50–57.
20. Жарковский А. А., Щуцкий С. Ю. Расчет пространственного пограничного слоя в рабочем колесе центробежной турбомашини. *Научно-технические ведомости СПбГПУ. Сер.: Наука и образование*. 2010. № 1 (95). С. 143–150.
21. Вахрушева О. С., Ковалев С. М., Шевченко Н. Г. Визначення гідравлічних втрат у сопловому апараті радіально-осьової гідротурбини на напорі понад 600 м. *Вісник Нац. техн. ун-та «ХПИ»: зб. наук. пр. Темат. вип.: Новітні рішення в сучасній техніці*. Харків: НТУ «ХПИ». 2009. № 37. С. 64–70.

References (transliterated)

1. Linnik A. V., Haitov V. D. Sovremennyy uroven' i osnovnye napravleniya razvitiya gidroturbostroeniya v Ukraine [The current level and main directions of development of hydroturbation in Ukraine]. *Problemy Mashinostroyeniya*. 2010, vol. 44, no. 8, pp. 11–18.
2. Hermod Brekke. *Hydraulic Turbines Design, Erection and Operation*. Endringsdato, Norway Publ., 2000. 317 p.
3. *Mirea. Federal'nyy katalog*. [Mirea. Federal directory]. MGU Publ., 2007. 35 p.
4. Challenges in the Design of Pump Turbines. *AndritzHydro CO. USA*, November 2012. 24 p.
5. Veremeenko I. S., Kantor B. Ya., Medkovskaya T. F., Rzhetskaya I. E., Andryuschenko S. A. Issledovanie napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya i optimizatsiya elementov konstruktzii protochnogo trakta gidroturbin [Investigation of the

- stress-strain state and optimization of structural elements of the flow path of hydraulic turbines]. *Aviatsionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya*. 2006, vol. 8, no. 34, pp. 104–108.
6. Xuanlin Peng, Jianzhong Zhou, Chu Zhang, Ruhai Li, Yanhe Xu, Diyi Chen. An Intelligent Optimization Method for Vortex-Induced Vibration Reducing and Performance Improving in a Large Francis Turbine. *Energies*. 2017, no. 10, pp. 1–17. doi: 10.3390/en10111901.
 7. Fedulov Yu. I., Suhobryy P. N., Agibalov E. S. Issledovanie protochnoy chasti obratimoy gidromashiny s ploskimi kol'tsami statora i ustanovkoy kol'tsevykh zatvorov [The study of the flow part of a reversible hydraulic machine with flat rings of the stator and the installation of an annular gate]. *Vestnik Khar'kovskogo politekhnicheskogo instituta: sb. nauch. tr.* [Bulletin of the Kharkov Polytechnic Institute: a collection of scientific papers]. Kharkov, Vyssha shkola Publ., 1988, issue 22: Gidravlicheskie mashiny [Hydraulic machines], pp. 17–20.
 8. *Issledovanie elementov protochnykh chastey Rogunskoy GES, Dnestrovskoy GAES i dr. GES i AES. Otchet o NIR* [Investigation of the elements of flow-through parts of the Rogun HPS, Dniester PSP and other HPS i NPP]. Kharkov, NTU "KhPI" Publ., 2000. 120 p.
 9. Chernyy S. G., Avdyushenko A. Yu., Chirkov D. V. Chislennaya model' techeniya v gidroturbine s zatvorom [Numerical model of flow in a water turbine with a shutter]. *Vestnik Vostochno-Kazahstanskogo gos. tehn. un-ta im. D. Serikbaeva: sb. nauch. tr. Temat. vyp.: Vychislitel'nye tekhnologii* [Bulletin of the East Kazakhstan State Technical University D. Serikbaeva: a collection of scientific papers. Thematic issue: Computational Technologies]. Ust-Kamenogorsk Publ., 2013, pp. 266–274.
 10. Topazh G. I. *Lopastnye gidromashiny i gidrodinamicheskie peredachi. Osnovy rabocheho protsessu gidroturbin* [Vane hydraulic machines and hydrodynamic transmission. Basics of the workflow hydroturbines]. Sankt-Peterburg, Politehn. Universitet. Publ., 2011. 154 p.
 11. Pugachev P. V., Aleksenskiy V. A., Zharkovskiy A. A. Raschetnoe issledovanie poter' v napravlyayushchikh apparatakh kanal'nogo i reshetochnogo tipov [Estimated study of losses in the guide vanes channel and lattice types]. *Nasosy & oborudovanie*. 2011, no. 1, pp. 44–66.
 12. Blazek Jiri. *Computational Fluid Dynamics: Principles and Applications*. Waltham, Helsevier Publ., 2015. 440 p.
 13. Jaymin Desai, Amit Roghelia, Vishal A. Soni. Validation of Hydraulic Design of Spiral Casing and Stay Vanes of Francis Turbine Using CFD. *Conference Paper (16–18 December 2010, Chennai, India)*.
 14. Susan-Resiga R. F., Muntean S., Avellan F., Anton I. Mathematical modelling of swirling flow in hydraulic turbines for the full operating range. *Applied Mathematical Modelling*. 2011, no. 35, pp. 4759–4773.
 15. Ganesh Chembedu, Alleiah Sunkara, Mayank Srivastava. Automizing the Design of Francis Turbine Spiral Case. *International Journal of Advanced Mechanical Engineering*. Vol. 4, no. 5 (2014), pp. 463–472.
 16. Sukhobryy P. N., Men'shikova L. L., Barlit V. V., Drankovskiy V. E., Eskribano E. M. Optimizatsiya podvoda radial'no-osevykh vysokonapornykh gidroturbin na osnove chislennogo issledovaniya kinemacheskikh kharakteristik i poter' energii [Optimization of the supply of radial-axial high-pressure hydraulic turbines based on a numerical study of the kinematic characteristics and energy loss]. *Problemy mashinostroeniya*. 2003, vol. 2, pp. 590–594.
 17. Drankovskiy V. E., Rezvaya K. S., Krupa E. S. Calculating three-dimensional fluid flow in the spiral casing of the reversible hydraulic machine in turbine mode. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Hydraulic machines and hydraulic units*. Kharkiv: NTU "KhPI" Publ., 2016, no. 20 (1192), pp. 53–57.
 18. Potetenko O. V., Shevchenko N. G., Radchenko L. R. Vliyanie zakonomernostey struktury potoka v protochnoy chasti vysokonapornoy RO gidroturbiny na osobennosti matematicheskogo modelirovaniya [The influence of regularities of the flow structure in the flow part of the high-pressure RO of the hydroturbine on the features of mathematical modeling]. *Vestnik Nats. tekhn. un-ta "KhPI": sb. nauch. tr. Temat. vyp.: Energeticheskie i teplotekhnicheskie protsessy i oborudovanie* [Bulletin of the National Technical University "KhPI": a collection of scientific papers. Thematic issue: Energy and heat engineering processes and equipment]. Kharkov, NTU "KhPI" Publ., 2003, no. 10, pp. 130–143.
 19. Potetenko O. V., Drankovskiy V. E., Krupa E. S. Vihrevaya struktura potoka i analiz razlichnykh matematicheskikh modeley potoka v kanalah vysokonapornykh radialno-osevykh gidroturbin RO 400, RO 500 i RO 600 [Vortex flow structure and analysis of various mathematical flow models in high-pressure channels of radial-axial hydraulic turbines RO 400, PO 500 and PO 600]. *Skhidno-Yevropeys'kyi zhurnal peredovykh tekhnolohiy*. 2012, vol. 318, no. 57, pp. 50–57.
 20. Zharkovskiy A. A., Shchutskiy S. Yu. Raschet prostranstvennogo pogranichnogo sloya v rabochem kolese tsentroběžhnoy turbomashiny [The calculation of the spatial boundary layer in the impeller of the centrifugal turbomachine]. *Nauchno-tekhnicheskie vedomosti SPbGPU. Seriya: Nauka i obrazovanie*. 2010, vol. 1, no. 95, pp. 143–150.
 21. Vakhrusheva O. S., Kovalev S. M., Shevchenko N. H. Vyznachennya hidravlichnykh vtrat u soplovomu aparati radial'no-osovoyi hidroturbiny na napory ponad 600 m [Determination of hydraulic losses in a nozzle apparatus of a radial-axial hydro turbine at a pressure of more than 600 m]. *Vestnik Nats. tekhn. un-ta "KhPI": sb. nauch. tr. Temat. vyp.: Novitni rishennya v suchasnyy tehnitsi* [Bulletin of the National Technical University "KhPI": a collection of scientific papers. Thematic issue: Newest solutions in modern technology]. Kharkiv, NTU "KhPI" Publ., 2003, no. 10, pp. 64–70.

Поступила (received) 24.04.2019

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Шевченко Наталія Григорівна (Шевченко Наталья Григорьевна, Shevchenko Nataliya Grygorivna) – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри «Гідравлічні машини ім. Г. Ф. Проскури»; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6877-7428>; e-mail: shevng@ukr.net

Гришин Олександр Мефодієвич (Гришин Александр Мефодиевич, Grishin Oleksandr Mefodiyovuch) – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», старший викладач кафедри «Гідравлічні машини ім. Г. Ф. Проскури»; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5977-9248>; e-mail: amgrishin@gmail.com

Коваль Олена Сергіївна (Коваль Елена Сергеевна, Koval Olena Serhiyivna) – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», аспірант кафедри «Гідравлічні машини ім. Г. Ф. Проскури»; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1858-1336>; e-mail: elenakoval86@ukr.net