

УДК 621.224

А.В. РУСАНОВ¹, О.Н. ХОРЕВ¹, Д.Ю. КОСЬЯНОВ¹, С.А. РЯБОВА²,
П.Н. СУХОРЕБРЫЙ¹

¹Институт проблем машиностроения им. А.Н. Подгорного НАН Украины

²ПАО «Турбоатом», Харьков, Украина

ВЛИЯНИЕ ОКРУЖНОГО НАВАЛА ЛОПАСТЕЙ РАБОЧЕГО КОЛЕСА ОСЕВОЙ ГИДРОТУРБИНЫ НА СТРУКТУРУ ПОТОКА В ОТСАСЫВАЮЩЕЙ ТРУБЕ

Представлены результаты численного исследования влияния окружного навала лопастей рабочего колеса осевой поворотной-лопастной гидротурбины на характеристики потока жидкости в отсасывающей трубе. Моделирование течения выполнено на основе численного интегрирования уравнений Рейнольдса с дополнительным членом, содержащим искусственную сжимаемость. Для учета турбулентных эффектов применена двухпараметрическая модель турбулентности SST Ментера. Приведены структура потока и зависимость значений КПД проточной части от величины навала на оптимальном режиме работы. Расчеты выполнены с использованием программного комплекса IPMFlow.

Ключевые слова: гидротурбина, проточная часть, рабочее колесо, отсасывающая труба, пространственное профилирование, окружной навал лопастей.

Введение

Статья является продолжением публикаций о влиянии навалов лопасти рабочего колеса (РК) на структуру потока в элементах проточной части (ПЧ) и ее энергетические характеристики [1-3]. Применение навалов лопастей – один из методов пространственного профилирования основных элементов ПЧ. При навалах форма сечений лопастных систем остается неизменной, меняется только вид линии привязки и, как следствие, взаимное положение сечений в окружном или осевом направлениях. На рис. 1 приведена схема периферийного окружного навала. Сложный навал образуется за счет придания оси лопасти формы кривой второго порядка, которая задается углом саблевидности γ_U и относительной длиной изогнутого участка лопасти \bar{l}_U . Параметр \bar{l}_U определяется по формуле

$$\bar{l}_U = \frac{l_U}{l/2} \cdot 100\% . \quad (1)$$

В выполненных исследованиях рассматривались варианты сложного окружного навала с постоянным значением $l_U = 1/2$ и переменными величинами углов саблевидности γ_U . Численные исследования проведены для расчетных областей с исходными лопастями РК (угол саблевидности $\gamma_U = 0^\circ$) и четырьмя вариантами сложного окружного навала (углы саблевидности $\gamma_U = -40^\circ; -20^\circ; +20^\circ; +40^\circ$). При-

менение навала с углом $\gamma_U = 40^\circ$ приводит к сдвигу периферийного сечения в окружном направлении относительно исходного варианта на $7,5^\circ$, с углом $\gamma_U = 20^\circ$ – на $3,3^\circ$. На рис. 2 представлены компьютерные модели исходной лопастной системы РК, а также с углами саблевидности $\gamma_U = -40^\circ$ и $+40^\circ$.

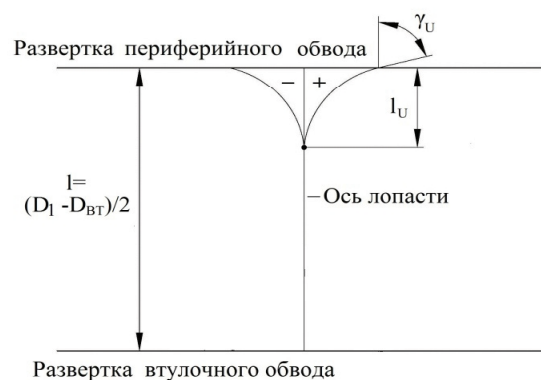


Рис. 1. Схема сложного окружного периферийного навала

В статье [3] приведены результаты исследования влияния окружного периферийного навала на структуру потока в области рабочего колеса и гидродинамические характеристики ПЧ, включающей направляющий аппарат, РК и отсасывающую трубу (ОТ). Настоящая статья посвящена более подробному анализу структуры и характеристик потока в отсасывающей трубе при разных значениях навала лопастей РК.

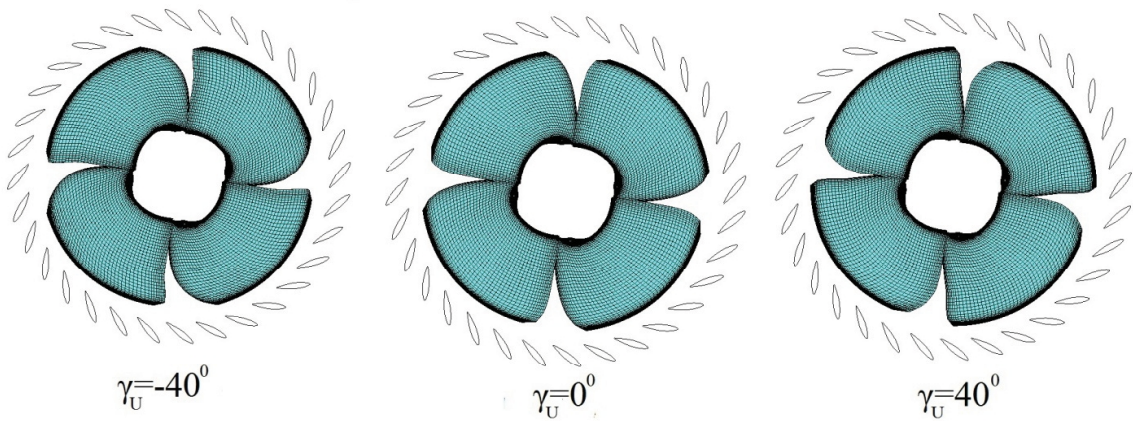


Рис. 2. Компьютерные модели РК с разными значениями угла саблевидности сложного окружного навала

Математическая модель

Моделирование течения вязкой несжимаемой жидкости в проточной части гидротурбины выполнено при помощи программного комплекса IPRflow на основе численного интегрирования уравнений Рейнольдса с дополнительным членом, содержащим искусственную сжимаемость. Уравнения Рейнольдса с двухпараметрической моделью турбулентности $k-\omega$, записанные в векторной форме в декартовой системе координат, вращающейся с постоянной угловой скоростью Ω вокруг оси x , имеют вид

$$\frac{\partial}{\partial t} Q + \frac{\partial}{\partial x} (E_i + E_v) + \frac{\partial}{\partial y} (F_i + F_v) + \frac{\partial}{\partial z} (G_i + G_v) = H, \quad (2)$$

где $Q = (P/\beta, u, v, w, k, \omega)^T$;

$$P = \frac{p}{\rho_*}; \quad (3)$$

$$H_k = (\tilde{P}_k - \varepsilon) f_6; \quad (4)$$

$$H_\omega = \left[\frac{\gamma}{v_t} P_k - \beta \omega^2 f_4 + (1 - f_1) \frac{2}{\omega \sigma_{\omega 2}} C_D \right] f_7; \quad (5)$$

$$E_i = (u, u^2 + P, uv, uw, uk, u\omega)^T; \quad (6)$$

$$F_i = (v, vu, v^2 + P, vw, vk, v\omega)^T; \quad (7)$$

$$G_i = (w, wu, wv, w^2 + P, vw, wk, w\omega)^T; \quad (8)$$

$$E_v = (0, -\tau_{xx}, -\tau_{xy}, -\tau_{xz}, -\chi_{kx}, -\chi_{\omega x})^T; \quad (9)$$

$$F_v = (0, -\tau_{xy}, -\tau_{yy}, -\tau_{yz}, -\chi_{ky}, -\chi_{\omega y})^T; \quad (10)$$

$$G_v = (0, -\tau_{zx}, -\tau_{zy}, -\tau_{zz}, -\chi_{kz}, -\chi_{\omega z})^T, \quad (11)$$

где x, y, z, t – декартовы координаты и время;

Q – вектор консервативных переменных;

E_i, F_i, G_i – векторы потоков (невязкая часть);

E_v, F_v, G_v – векторы потоков (вязкая часть);

p, P, u, v, w – статическое и кинематическое давление, компоненты вектора скорости;

k, ω – кинетическая энергия турбулентности, удельная скорость диссипации;

ρ_* – плотность жидкости;

Коэффициент искусственной сжимаемости жидкости β для обеспечения высокой скорости сходимости рекомендуется выбирать из следующих соотношений

$$\beta = \max(0.3, r(u^2 + v^2 + w^2)), \quad r = 1 \dots 5$$

или

$$\beta = \delta_1 a_*^2 + \delta_0, \quad \delta_1 = 1 \dots 5, \quad 0 < \delta_0 \ll 1.$$

Для численного решения уравнений задаются дополнительные условия на границах расчетной области. На входе задаем распределение компонент вектора скорости, на выходе – распределение статического давления p , на стенках задается условие прилипания $\vec{V} = 0$.

Численное интегрирование уравнений проводится с помощью неявной квазилинейной схемы Годунова второго порядка точности по пространству и времени. Более подробное описание математической модели и численного метода представлено в работах [4, 5].

Объект исследования. Методика проведения численного эксперимента

В качестве объекта исследования рассмотрена ПЧ осевой поворотно-лопастной гидротурбины ПЛ20 Кременчугской ГЭС [6]. Расчетная область состоит из лопаток направляющего аппарата, лопастей РК, а также ОТ. Основные характеристики НА: лопатки симметричного профиля УП-32-2 высотой $b_0 = 0,4D_1$, диаметр расположения осей поворота лопаток $D_0 = 1,1625D_1$. РК ПЛ 20/3271у-В с диаметром втулки $d_{вт} = 0,37D_1$ и числом лопастей $z_1 = 4$. Основные характеристики ОТ: высота $h = 1,915D_1$, длина $l = 4,1D_1$, колено типа 4А (рис. 1).

Расчетная область содержит по одному каналу НА и РК, а также отсасывающую трубу, и отображается с использованием сетки, у которой элементарным объемом (ячейкой) является шестигранник. Суммарное число ячеек в расчетной области $72 \times 72 \times (100 + 200) + 1.200.000 = 2.755.200$.

Численные исследования проведены для модели с диаметром РК $D_1 = 1$ м при напоре $H = 1$ м на оптимальном режиме: открытие НА $a_0 = 56,52$ мм, значение угла установки лопасти РК $\phi_l = 15^\circ$, приведенный расход $Q_1' = 1117,9$ л/с, приведенная частота вращения $n_1 = 152,9$ мин⁻¹, угол потока на входе в расчетную область $\alpha_{п} = 38,9^\circ$ [6].

Результаты исследований

Анализ проведенных исследований показал заметное влияние навалов РК на характеристики потока в ОТ. На рис. 3 приведена компьютерная модель трубы, а также расположение ее характерных сечений. На рис. 3в приведено распределение относительной площади F^* поперечных сечений отсасывающей трубы по длине в зависимости от их номера. Под относительной площадью понимается отношение площади текущего сечения к площади входного в ОТ (сечение 1). Как видно, по всей длине ОТ, кроме сечения 5, течение диффузорное. Это обеспечивает преобразование кинетической энергии потока в энергию давления и повышение эффективности работы турбины.

На рис. 4 приведено распределение меридиональной (расходной) V_m и окружной скорости V_u , а также абсолютного угла потока α за РК (на входе в ОТ) по ширине канала при разных значениях угла саблевидности γ_U . Эти данные необходимы для оценки изменения граничных условий на входе в отсасывающую трубу. Из рисунка видно, что применение сложного окружного периферийного навала мало влияет на величину закрутки потока и значение угла потока за РК. Навалы заметно влияют на распределение расходной скорости V_m . Для исследуемого РК наиболее плавная эпюра скорости получена при угле саблевидности $\gamma_U = -20^\circ$. Более равномерное распределение V_m на входе в отсасывающую трубу, как правило, приводит к улучшению течения в ней и повышению энергетических показателей ПЧ в целом.

дующего РК наиболее плавная эпюра скорости получена при угле саблевидности $\gamma_U = -20^\circ$. Более равномерное распределение V_m на входе в отсасывающую трубу, как правило, приводит к улучшению течения в ней и повышению энергетических показателей ПЧ в целом.

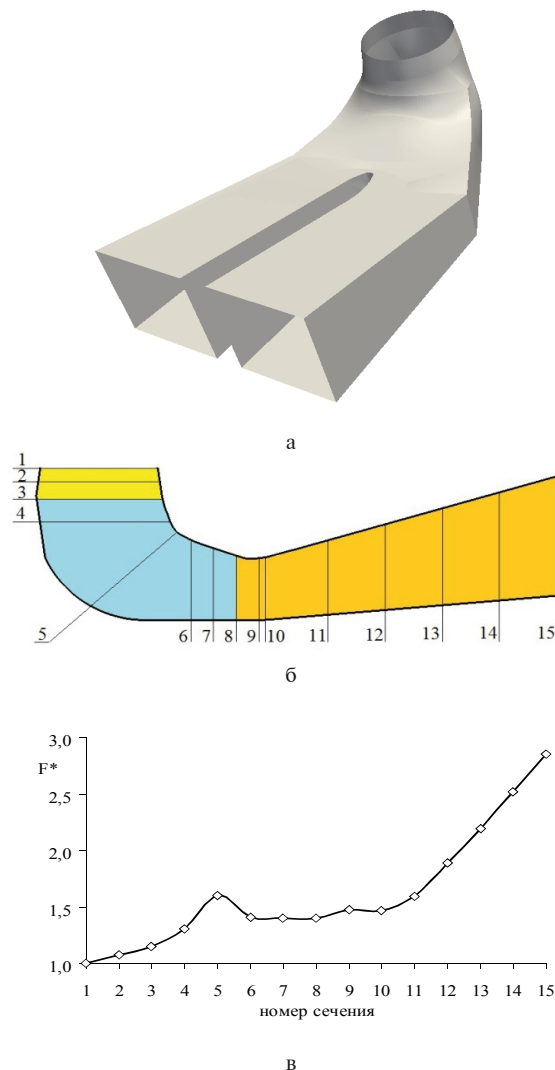
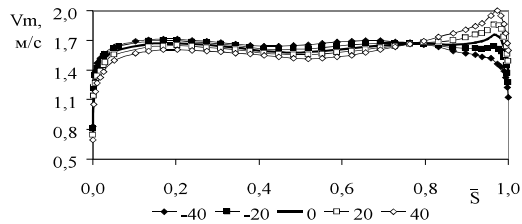


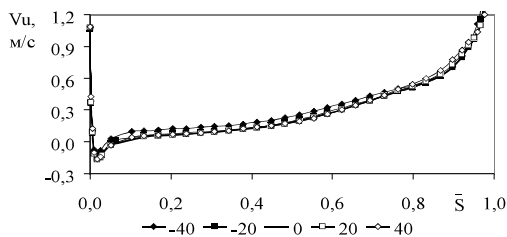
Рис. 3. Отсасывающая труба Кременчугской ГЭС: а) компьютерная модель; б) характерные сечения для исследования структуры потока; в) изменение относительной площади сечений отсасывающей трубы

На рис. 5а показано изменение осредненного по площади статического давления (относительно величины давления на входе в ОТ) по сечениям при разных значениях навала лопастей РК. На рис. 5б приведено изменение распределения давления в трубе относительно исходного варианта РК. Применение навалов с отрицательным углом саблевидности приводит к повышению величины статического давления относительно исходного варианта; а с положительным — к понижению. Наиболее благоприятное распределение получено при навале РК

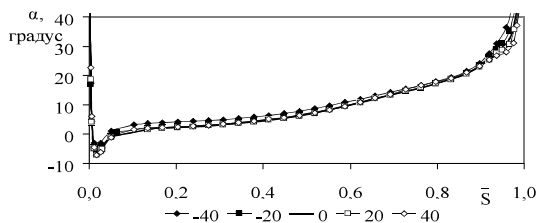
с углом саблевидности $\gamma_U = -20^\circ$. Из рисунка видно, что навалы оказывают незначительное влияние на значения давления в вертикальном диффузоре (сечения 1-3). Наибольшее изменение происходит в колене (сечения 3-8). В отводящем горизонтальном диффузоре (сечения 8-15) статическое давление продолжает повышаться, но его уровень относительно исходного варианта падает во всех расчетных ПЧ, кроме варианта РК с навалом $\gamma_U = -20^\circ$.



а



б



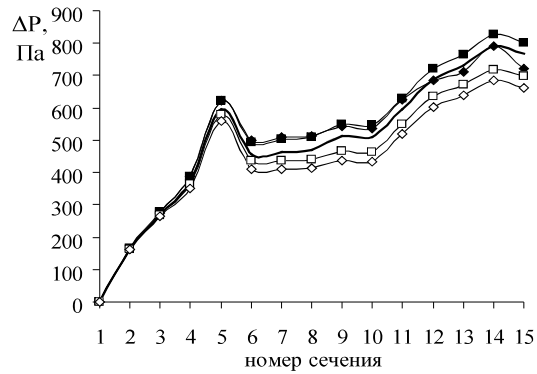
в

Рис. 4. Распределение компонент скорости и угла потока на входе в отсасывающую трубу:

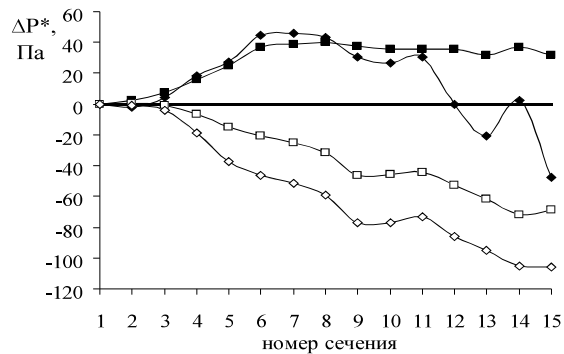
- а) меридиональной скорости V_m ; б) окружной скорости V_u ;
- в) абсолютного угла потока α

На рис.6 приведено распределение изолиний расходной скорости в выходном сечении ОТ (№15) при разных значениях навалов лопастей РК. Как видно из рисунка, у всех вариантов ПЧ наблюдается заметная неравномерность распределения скорости — ее уровень в правом канале (по ходу течения) заметно ниже, чем в левом. Наиболее благоприятная картина течения в исходном варианте и с навалом рабочего колеса $\gamma_U = -20^\circ$. В этих ПЧ практически отсутствуют зоны с обратным течением на выходе. В других же ПЧ — с увеличением угла саблевидности как в одну, так и в другую сторону — повышается

неравномерность распределения скорости за счет ее значительного роста в левом канале и увеличения размеров и интенсивности зон с обратным течением потока.



а



б

- ♦— $\gamma_U = -40^\circ$; —■— $\gamma_U = -20^\circ$; — $\gamma_U = 0^\circ$;
- $\gamma_U = +20^\circ$; —○— $\gamma_U = +40^\circ$

Рис. 5. Распределение статического давления вдоль отсасывающей трубы:

- а) восстановление давления относительно значения на входном сечении;
- б) характер приращения статического давления в отсасывающей трубе относительно варианта $\gamma_U = 0^\circ$

Проведенные исследования дали возможность оценить зависимость энергетических показателей ПЧ от величины навала. На рис.7 приведены зависимости потерь энергии в ОТ и относительного КПД всей расчетной ПЧ. Под относительным КПД понимается отношение этого параметра в проточных частях с РК с навалами к значению КПД исходного варианта ($\gamma_U = 0^\circ$). Меньшие значения потерь энергии в трубе h_{OT} наблюдаются у исходного варианта РК ($\gamma_U = 0^\circ$) и при угле саблевидности навала $\gamma_U = -20^\circ$, где значения потерь составляют порядка 1,90%. При увеличении угла саблевидности уровень потерь в ОТ начинает заметно возрастать.

Это связано с перераспределением компонент скорости (в основном на периферии) на входе в отсасывающую трубу вследствие приме-

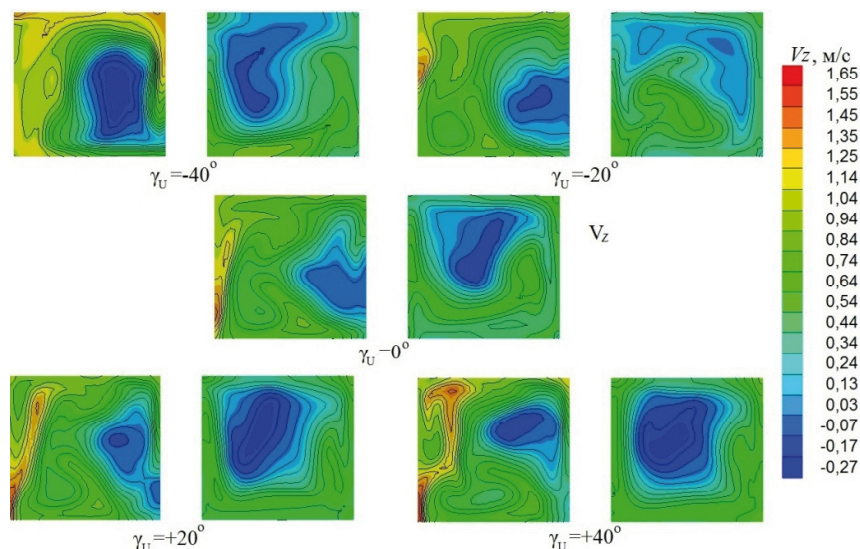


Рис. 6. Изолинии расходной компоненты вектора скорости в выходном сечении отсасывающей трубы

нения навала РК (рис.4), что, в свою очередь, привело к изменению структуры потока в самой ОТ. Максимальное значение относительного КПД получено в ПЧ с РК с углом саблевидности $\gamma_U = -20^\circ$ – повышение составило около 0,74 %. Следует отметить, что в этой ПЧ величина срабатываемого напора H по сравнению с исходным практически не изменилась (разность менее 0,1 %), т.е. положение режимной точки в поле универсальной характеристики осталось прежним.

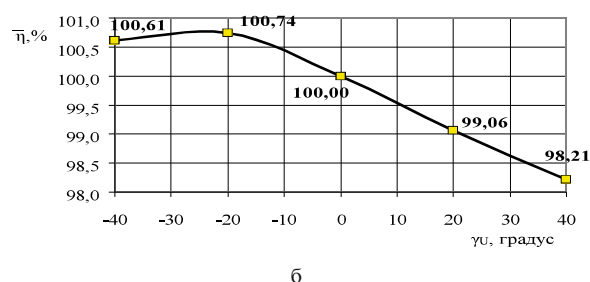
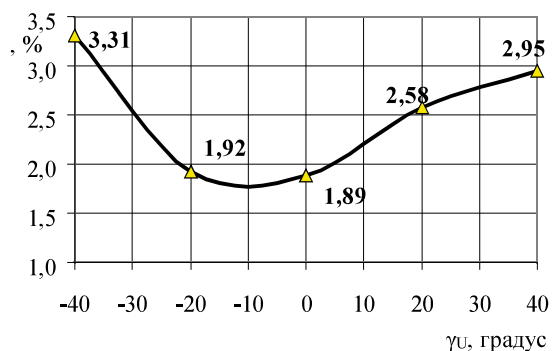


Рис. 7. Зависимость энергетических характеристик от величины навала:
а) потери энергии в ОТ; б) относительный КПД

Заключение

Выполнено численное исследование влияния сложного окружного навала лопасти РК осевой гидротурбины ПЛ20 Кременчугской ГЭС на характеристики потока в отсасывающей трубе. В результате установлено, что применение периферийного окружного навала:

- заметно влияет на распределение статического давления вдоль трубы;
- оказывает существенное влияние на распределение расходной составляющей скорости в трубе;
- позволило добиться повышения максимального значения КПД при оптимальном режиме работы современной высокоэффективной проточной части Кременчугской ГЭС.

Учет отсасывающей трубы в расчетной области дал возможность более точно смоделировать течение жидкости в проточной части, учесть взаимное влияние ее элементов.

Литература

1. Влияние простого окружного навала лопастей рабочего колеса осевой гидротурбины ПЛ20 на гидродинамические характеристики проточной части [Текст] : зб. наук. пр. / А. В. Русанов, О. Н. Хорев, А. В. Линник [и др.] // Вісник НТУ «ХПІ». Сер.: Гідравлічні машини та гідроагрегати. – Вип. 3 (1112). – Х., 2015. – С. 8-12.
2. Влияние сложного окружного навала лопастей рабочего колеса осевой гидротурбины на структуру потока и энергетические характеристики проточной части [Текст] : зб. наук. пр. / А. В. Русанов, О. Н. Хорев, А. В. Линник [и др.] // Вісник НТУ «ХПІ». Сер.: Математичне моделювання в техніці та технологіях. – Вип. 18 (1127). – Х., 2015. – С. 130-141.

3. Влияние пространственного профилирования лопастей рабочего колеса на характеристики потока в проточной части осевой гидротурбины [Текст] : зб. наук. пр. / А. В. Русанов, О. Н. Хорев, Д. Ю. Косьянов [и др.] // Вісник НТУ «ХПІ». Сер. : Гідравлічні машини та гідроагрегати. – Вип. 20 (1192). – Х., 2016. – С. 8-14.

4. Русанов А. В. Численное моделирование течений вязкой несжимаемой жидкости с использованием неявной квази-монотонной схемы Годунова повышенной точности [Текст] / А. В. Русанов, Д. Ю. Косьянов // Восточ.-Европ. журн. передовых технологий. 2009. №5. С. 47.

5. Русанов А. В. Математическое моделирование нестационарных газодинамических процессов в проточных частях турбомашин [Текст]: монография / А. В. Русанов, С. В. Ершов. – Х.: Ин-т пробл. машиностроен. НАН Украины, 2008. 275 с.

6. Математическое моделирование течения жидкости и анализ характеристик потока в подводе гидротурбины ПЛ20 Кременчугской ГЭС [Текст] : зб.наук.пр./ А.В.Русанов, А.В.Линник, П.Н.Сухоребрий [и др.] // Вісник НТУ «ХПІ». Сер. : Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. – Вип. 1 (1044). – Х., 2014. – С.41-48.

Поступила в редакцию 30.05.2016

А.В. Русанов, О.М. Хорев, Д.Ю. Косьянов, С.О. Рябова, П.М. Сухоребрий. Вплив окружного навалу лопастей рабочего колеса на структуру потока у відсмоктувальній трубі осевої гідромашини

Представлено результати чисельного дослідження впливу окружного навалу лопастей рабочего колеса осевої поворотно-лопатевої гідротурбіни на характеристики потоку рідини в відсмоктувальній трубі. Моделювання течії виконано на основі чисельного інтегрування рівнянь Рейнольдса з додатковим членом, що містить штучну стисливість. Для обліку турбулентних ефектів застосована двопараметрична модель турбулентності SST Ментера. Наведено структуру потоку і залежність значень ККД проточної частини від величини навалу при оптимальному режимі роботи. Розрахунки виконані з використанням програмного комплексу IPMFlow.

Ключові слова: *гідротурбіна, проточна частина, робоче колесо, відсмоктувальна труба, просторове профілювання, окружний навал лопастей.*

A.V. Rusanov, O.N. Khoryev, D.Yu. Kosianov, S.A. Riabova, P.N. Sukhorebryi. Influence of the circular offset of the runner blades of the kaplan turbine on the flow pattern in the draft tube

The results of numerical investigation of influence of the circular offset of the runner blades of the Kaplan turbine upon characteristics of the fluid flow in the draft tube are presented. The flow simulation has been carried out on basis of numerical integration of the Reynolds equations with an additional term containing artificial compressibility. The differential two-parameter model of Menter (SST) has been applied to take into account turbulent effects. The flow pattern and dependences of the flow part from offset value at optimum operating condition is given. The investigations have been conducted by means of the software package IPMFlow.

Key words: *hydro turbine, flow part, runner, draft tube, spatial profiling, circular offset*