Интегральное уравнение на $[-1,1]$ **с логарифмическим ядром / Т. С. Полянская** // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Математичне моделювання в техніці та технологіях. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – № 16 (1188). – С. 81 – 85. Бібліогр.: 6 назв. – ISSN 2222-0631.

Integral equation on $[-1,1]$ **with a logarithmic kernel / T. S. Polyanskaya** // Bulletin of National Technical University «KhPI» Series: Mathematical modeling in engineering and technologies. – Kharkiv : NTU «KhPI», 2016. – № 16 (1188). – pp. 81 – 85. Bibliog.: 6 titles. – ISSN 2222-0631.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / Information about authors

Полянська Тетяна Семенівна – кандидат фізико-математичних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків; тел.: 093- 921-97-17; e-mail: tatyana-polyanskaya1@mail.ru.

Полянская Татьяна Семеновна – кандидат физико-математических наук, доцент, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», г. Харьков; тел.: 093- 921-97-17; e-mail: tatyana-polyanskaya1@mail.ru.

Polyanskaya Tatyana Semenowna – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkov; tel.: 093- 921-97-17; e-mail: tatyana-polyanskaya1@mail.ru.

УДК 621.224

А. В. РУСАНОВ, О. Н. ХОРЕВ, Д. Ю. КОСЬЯНОВ, С. А. РЯБОВА, П. Н. СУХОРЕБРЫЙ

ВЛИЯНИЕ ОСЕВОГО НАВАЛА ЛОПАСТЕЙ РАБОЧЕГО КОЛЕСА ОСЕВОЙ ГИДРОТУРБИНЫ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ТЕЧЕНИЯ В ПРОТОЧНОЙ ЧАСТИ

Представлено результати чисельного дослідження впливу складного осьового навалу лопатей робочого колеса осьової гідротурбіни ПЛ20 на характеристики потоку в проточній частині. Моделювання течії виконано на основі чисельного інтегрування рівнянь Рейнольдса і двопараметричної моделі турбулентності Ментера (SST). Розрахунки проведені за допомогою програмного комплексу IPMflow. Наведено аналіз структури потоку в розрахунковій області, що включає направляючий апарат, робоче колесо і відсмоктувальну трубу; представлені залежності значень ККД, потужності і напору від величини навалу при оптимальному режимі роботи.

Ключові слова: осьова гідротурбіна, проточна частина, просторове профілювання, осьовий навал, робоче колесо, відсмоктувальна труба, гідродинамічне вдосконалення.

Представлены результаты численного исследования влияния сложного осевого навала лопастей рабочего колеса осевой гидротурбины ПЛ20 на характеристики потока в проточной части. Моделирование течения выполнено на основе численного интегрирования уравнений Рейнольдса и двухпараметрической модели турбулентности Ментера (SST). Расчеты проведены с помощью программного комплекса IPMflow. Приведен анализ структуры потока в расчетной области, включающей направляющий аппарат, рабочее колесо и отсасывающую трубу, представлены зависимости значений КПД, мощности и срабатываемого напора от величины навала при оптимальном режиме работы.

Ключевые слова: осевая гидротурбина, проточная часть, пространственное профилирование, осевой навал, рабочее колесо, отсасывающая труба, гидродинамическое совершенствование.

The results of numerical investigation of the influence of the complex axial offset of the runner blades of the Kaplan turbine PL20 upon flow characteristics in the flow part are presented. The flow simulation has been carried out on basis of numerical integration of the Reynolds equations and the two-parameter turbulence model of Menter (*SST*). The calculations have been conducted with the help of the software system *IPMFlow*. The analysis of the flow pattern in the computational region including guide vanes, runner and draft tube is presented; the dependences of the values of efficiency, capacity and actuated head on the offset value at optimum operating condition are shown. As a result of investigations it is established that the application of peripheral axial offset: 1) has little impact on the flow pattern in the area behind the guide vanes and in front of the runner and significant impact behind the runner at the entrance to the draft tube; 2) leads to changes of the form of pressure diagrams on the surfaces of the runner blades, especially in the area of the inlet edges; 3) makes it possible to align the distribution of total pressure across the channel width of the runner; 4) impacts on the flow pattern and energy loss in the draft tube; 5) impacts on integral parameters of flow part: efficiency, capacity, head; 6) makes it possible to increase the maximum values of efficiency and capacity at the optimum operating condition of modern high-performance flow part of the Kremenchug HPP.

Key words: Kaplan turbine, flow part, spatial profiling, axial offset, runner, draft tube, hydrodynamic improvement.

Введение. Повышение эффективности гидротурбинного оборудования ГЭС является важной научно-технической проблемой, решение которой приводит к необходимости совершенствования существующих методов расчета и анализа рабочего процесса гидротурбин [1]. Перспективным способом повышения эффективности проточных частей (ПЧ) гидромашин является их гидродинамическое усовершенствование за счет пространственного профилирования лопастных систем. В ИПМаш НАН Украины накоплен большой опыт по пространст-

© А. В. Русанов, О. Н. Хорев, Д. Ю. Косьянов, С. А. Рябова, П. Н. Сухоребрый, 2016

венного профилирования лопастных систем. В ИПМаш НАН Украины накоплен большой опыт по пространственному профилированию направляющих и рабочих лопаток паровых турбин [2, 3] с помощью *окружного* и *осевого навалов*. При навалах форма сечений лопастей остается неизменной, меняется только вид линии привязки и, как следствие, взаимное положение сечений в окружном или осевом направлениях. Схема сложных навалов у периферии и у втулки приведена на рис. 1. Сложный навал в окружном или осевом направлениях образуется за счет придания линии привязки лопасти формы кривой второго порядка, которая задается углом саблевидности $\gamma_{U,D}$ и относительной длиной изогнутого участка лопасти $\overline{l}_{U,D}$. Индексом D обозначены величины,

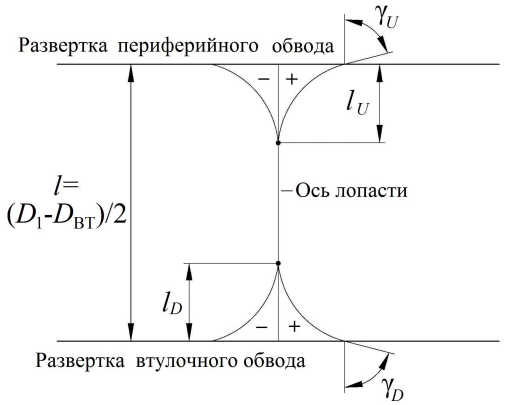


Рис. 1 – Схема сложного осевого навала лопасти рабочего колеса.

относящиеся к втулке, а индексом U – к периферии. Параметры $\overline{l}_U$ и $\overline{l}_D$ определяются по формулам:

$$\overline{l}_U = \frac{l_U}{l/2}\cdot 100\%;\ \overline{l}_D = \frac{l_D}{l/2}\cdot 100\%.$$

В рабочих колесах (РК) осевой гидротурбины в качестве линии привязки принимается ось поворота лопасти, после выполнения навалов в случае необходимости выбирается новая ось поворота. В исследованиях рассматривались варианты сложного осевого периферийного навала с постоянным значением $l_U = l/2$ и переменной величиной *угла саблевидности* γ_U.

Статья является продолжением исследований влияния навалов лопастей РК осевого типа на характеристики потока в ПЧ. В работах [4 – 6] рассмотрено влияние простого и сложного окружных навалов, в данной статье – осевого навала. В качестве объекта исследований принята ПЧ гидротурбины ПЛ20 Кременчугской ГЭС [4 – 8]. Расчетная область включала лопастные системы направляющего аппарата (НА) и РК, а также отсасывающую трубу (ОТ). Автоматизированное построение геометрической модели РК с навалами и расчетной сетки, а также численное исследование потока вязкой несжимаемой жидкости проведено при помощи программного комплекса *IPMFlow*.

Математическая модель. Моделирование течения вязкой несжимаемой жидкости в проточной части гидротурбины выполнено на основе численного интегрирования уравнений Рейнольдса с дополнительным членом, содержащим искусственную сжимаемость. Уравнения Рейнольдса с двухпараметрической моделью турбулентности k–ω, записанные в векторной форме в декартовой системе координат, вращающейся с постоянной угловой скоростью Ω вокруг оси x, имеют вид

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

где $Q = \left(P/\beta,\ u, v, w, k, \omega\right)^T$; $P = \dfrac{p}{\rho_*}$; $H = \left(0,\ g,\ y\Omega^2 + 2w\Omega,\ z\Omega^2 - 2v\Omega,\ H_k,\ H_\omega\right)^T$; $H_k = \left(\tilde{P}_k - \varepsilon\right) f_6$;

$$H_\omega = \left[\frac{\gamma}{\nu_t}P_k - \beta\omega^2 f_4 + \left(1 - f_1\right)\frac{2}{\omega\sigma_{\omega 2}}C_D\right] f_7;\quad E_i = \left(u,\ u^2 + P,\ uv,\ uw,\ uk,\ u\omega\right)^T;$$

$$F_i = \left(v,\ vu,\ v^2 + P,\ vw,\ vk,\ v\omega\right)^T;\quad G_i = \left(w,\ wu,\ wv,\ w^2 + P,\ vw,\ wk,\ w\omega\right)^T;$$

$$E_v = \left(0, -\tau_{xx}, -\tau_{xy}, -\tau_{xz}, -\chi_{kx}, -\chi_{\omega x}\right)^T;\quad F_v = \left(0, -\tau_{xy}, -\tau_{yy}, -\tau_{yz}, -\chi_{ky}, -\chi_{\omega y}\right)^T;$$

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

$x,\ y,\ z,\ t$ – 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:

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

или

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

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 квазимонотонной схемы Годунова* второго порядка точности по пространству и времени. Более подробное описание математической модели и численного метода представлено в работах [9, 10].

Дискретизация исследуемой проточной части выполнена с помощью сетки с шестигранными ячейками общим числом ячеек 1.578 млн: один межлопаточный канал в решетке НА – 456 тыс., один межлопастной канал в решетке РК – 622 тыс., отсасывающая труба − 500 тыс.

Численные исследования проведены для модели с диаметром РК $D_1 = 1$ м, напоре $H = 1$ м при угле установки лопасти РК $\varphi_л = 15^\circ$ при оптимальном режиме: приведенный расход $Q_I^{'} = 1117,9$ л/с, приведенная частота вращения $n_I^{'} = 152,9$ мин$^{-1}$, открытие НА $a_0 = 56,52$ мм, угол потока на входе в расчетную область $\alpha_п = 38,9^\circ$ [7, 8].

Результаты расчетного исследования течения жидкости в проточной части. Проведен численный эксперимент для ПЧ с исходным РК ($\gamma_U = 0^\circ$) и лопастей рабочего колеса с осевым периферийным навалом при четырех значениях углов саблевидности γ_U: -20°; -10°; $+10^\circ$; $+20^\circ$. Осевой навал с положительными значениями угла саблевидности приводит к смещению периферийного участка лопасти вниз по потоку и, наоборот, с отрицательными – вверх. На рис. 2 приведены радиальные сечения лопастей РК, проходящие через ось поворота, при трёх разных значениях осевого периферийного навала.

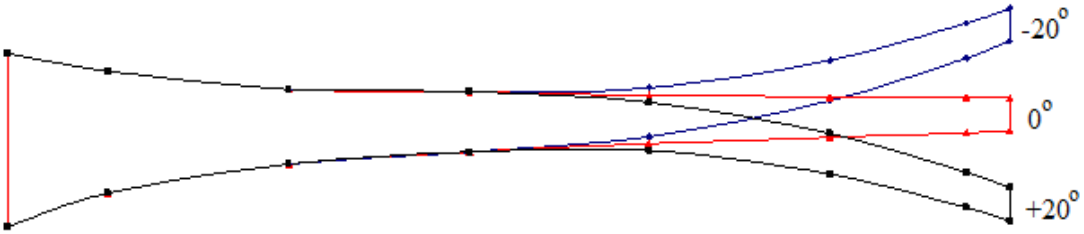


Рис. 2 – Радиальные сечения лопастей РК с навалами при углах саблевидности $\gamma_U = -20^\circ$; 0°; $+20^\circ$.

Влияние навала на структуру потока оценивалось по характеру распределения компонент скорости области за НА, перед и за РК, по эпюрам распределения давления вдоль сечений РК и по распределению полного давления по ширине канала в области рабочего колеса, а также характеристикам потокам в отсасывающей трубе.

Исследования показали, что применение осевого навала лопастей РК практически не оказывает влияния на распределение компонент скорости и угла потока за НА.

Осевой периферийный навал оказывает незначительное влияние на структуру потока в зоне перед РК. Небольшое отличие в распределении компонент скорости и тангенциального угла потока наблюдается только на периферийном участке.

На рис. 3 приведено распределение давления на поверхностях лопастей у втулки (10 % ширины канала), среднем сечении (50 %) и периферии (90 %) РК для пяти вариантов осевого навала. Как видим, применение осевого навала приводит к заметному изменению перепада давления вдоль сечений лопасти. Большее влияние навал оказывает на вид эпюр давления на напорной стороне: положительные углы саблевидности γ_U (и, соответственно, смещение периферийной части лопасти вниз по потоку) повышает уровень давления, отрицательные – понижают. На стороне разрежения навалы оказывают заметное влияние на величину давления только на периферии в области входной кромки: положительные углы саблевидности γ_U приводят к понижению давления, отрицательные – к повышению (рис. 3, *в*).

На рис. 4 показано распределение осредненного по шагу абсолютного полного давления (энергии) по ширине канала в среднем поперечном сечении межлопастного канала РК при разных значениях угла саблевидности γ_U. Из представленных результатов видно, что навалы заметно изменяют графики, распределяют энергии по ширине канала. Навалы с положительными значениями угла γ_U приводят к повышению значений энергии почти по всей ширине канала, начиная от втулки, а отрицательные понижают. На относительной ширине канала около 95 % значения полного давления выравниваются, и на периферии наблюдается обратная картина распределения. Таким образом, применяя осевой навал, можно добиться более равномерного распределения энергии по ширине канала РК.

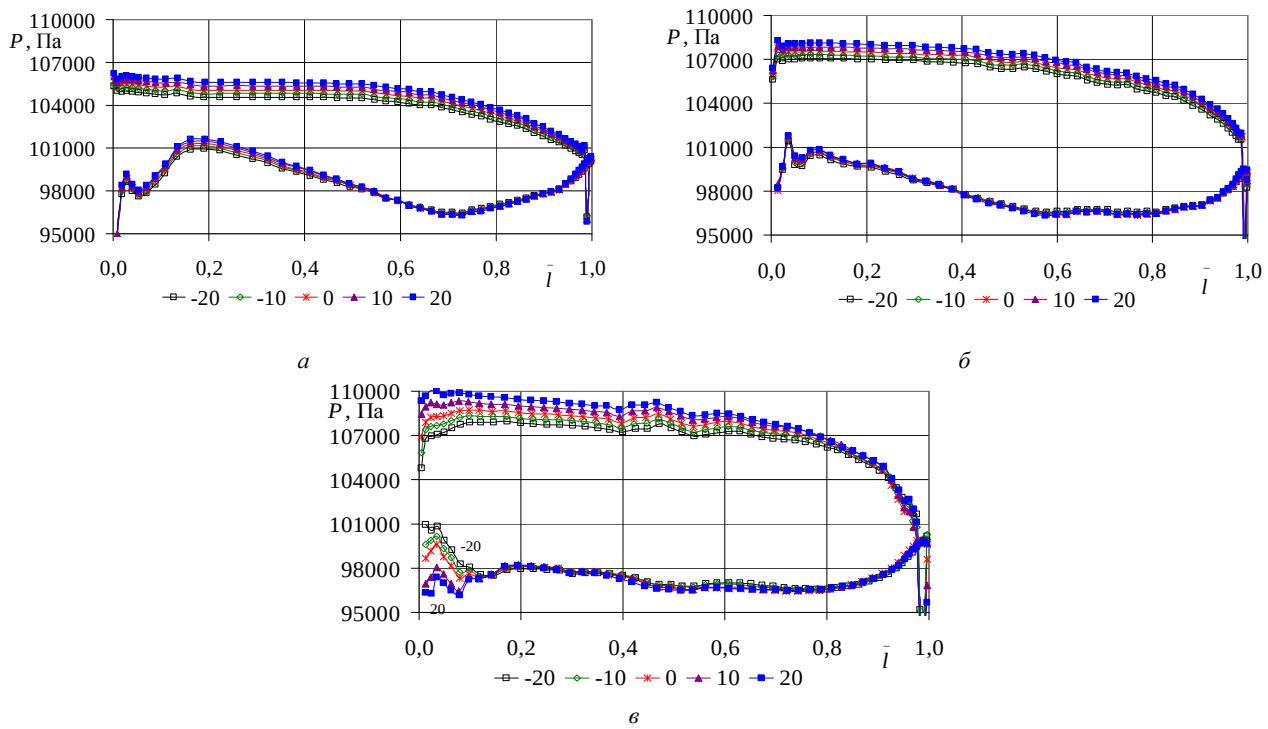


Рис. 3 – Распределение давления вдоль сечений лопасти РК при разных значениях угла саблевидности γ_U :
а – втулочное; *б* – среднее; *в* – периферийное.

На рис. 5 приведено распределение по ширине канала меридиональной (расходной) V_m и окружной скорости V_u, а также абсолютного угла потока α_2 за РК при разных значениях угла саблевидности γ_U. Эти данные необходимы для оценки эффективности работы РК и определения граничных условий на входе в отсасывающую трубу. Из рисунка видно, что применение осевого периферийного навала приводит к заметному перераспределению компонент скорости и угла потока по ширине канала. Навалы лопасти с положительными углами саблевидности приводят к повышению уровня расходной скорости во втулочной области, с отрицательными – к понижению. При относительной ширине канала 60 % эпюры практически сходятся в одной точке, после чего наблюдается обратная картина влияния навала. Наиболее равномерное распределение меридиональной скорости наблюдается в исходном варианте и при углах саблевидности γ_U, равных $+10^\circ$ и -10°.

Окружные скорости во втулочной зоне имеют небольшие отрицательные значения и при движении в сторону периферии плавно повышаются. Навалы с положительными углами саблевидности приводят к понижению значений окружной скорости практически по всей ширине канала.

Распределение абсолютного тангенциального угла потока за РК имеет такой же вид, как у окружной скорости.

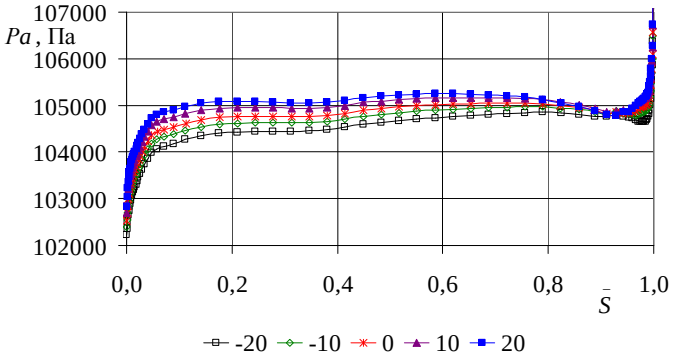


Рис. 4 – Распределение осредненного по шагу абсолютного полного давления по ширине канала в среднем поперечном сечении межлопастного канала РК при разных значениях осевого навала.

Проведенные исследования показали влияние осевого навала лопастей РК на характеристики потока в ОТ. На рис. 6 приведено расположение характерных сечений отсасывающей трубы и распределение относительной площади F^* поперечных сечений по длине в зависимости от их номера. Под относительной площадью понима-

ется отношение площади текущего сечения к площади входного в ОТ (сечение 1). Течение по всей длине, кроме сечения 5, диффузорное, что обеспечивает преобразование кинетической энергии потока в энергию давления.

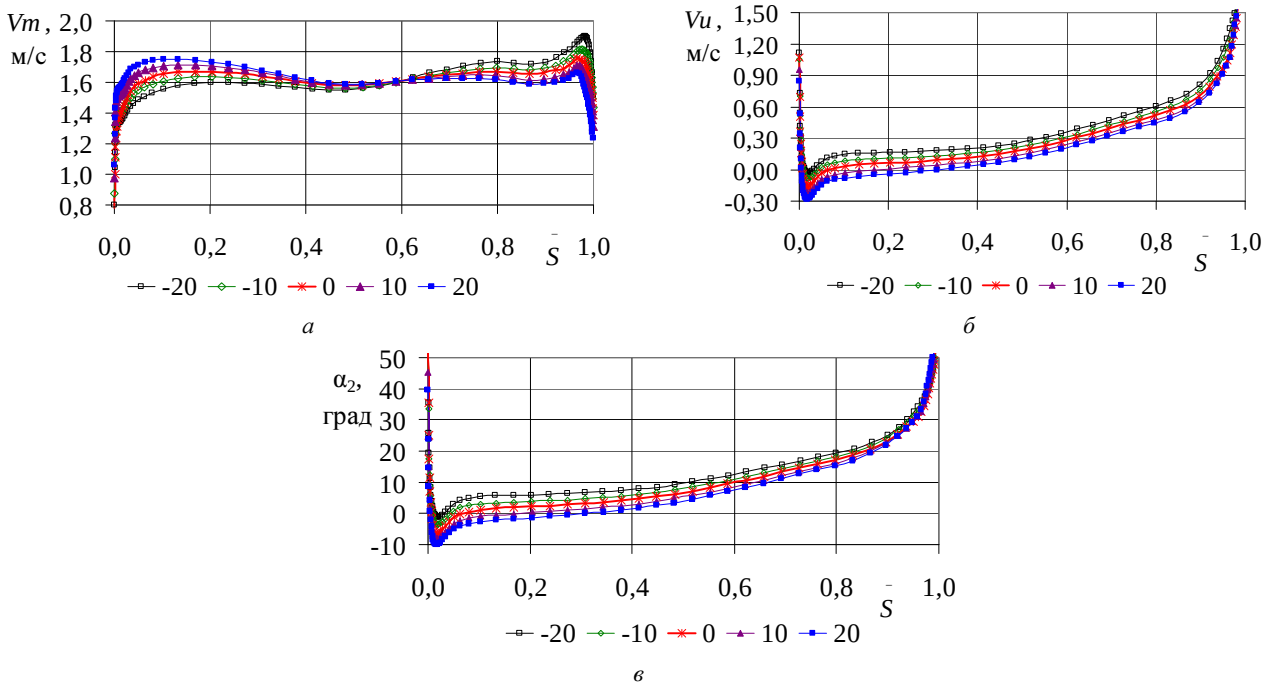


Рис. 5 – Распределение по ширине канала параметров потока за РК при разных значениях угла саблевидности γ_U : *а* – меридиональной скорости V_m ; *б* – окружной скорости V_u ; *в* – абсолютного угла потока α_2 .

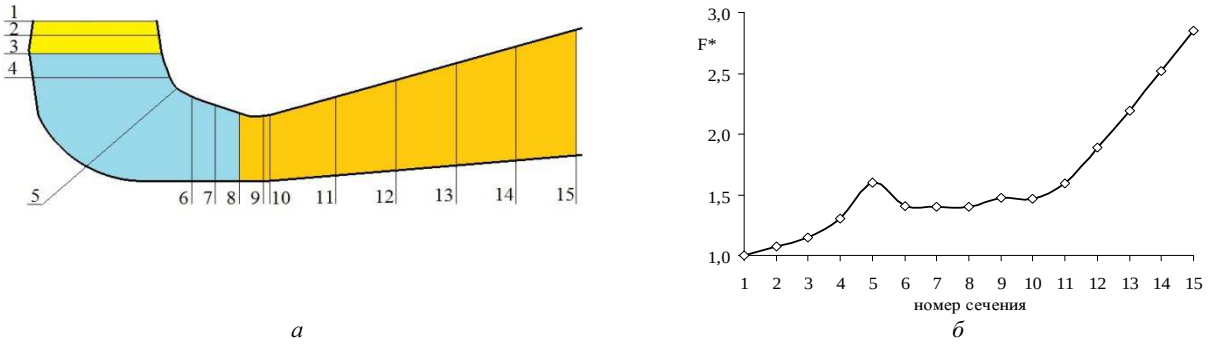
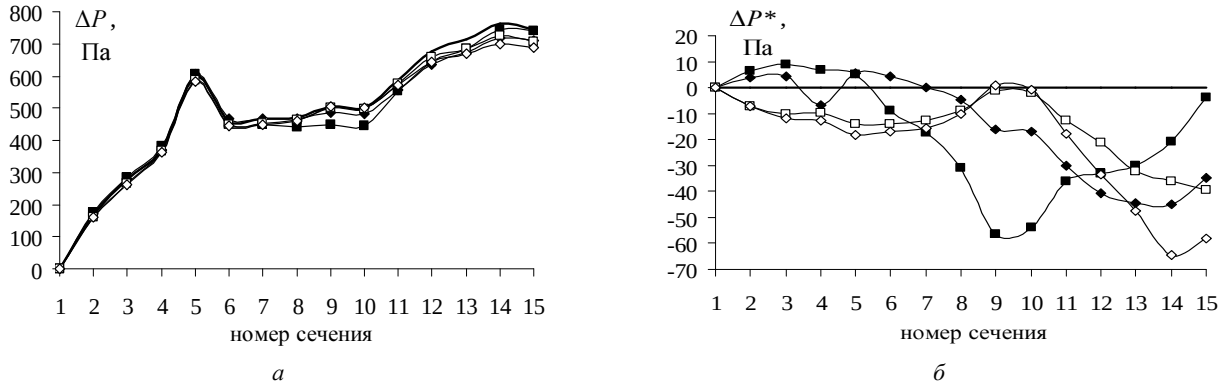


Рис. 6 – Отсасывающая труба Кременчугской ГЭС: *а* – характерные сечения для исследования структуры потока; *б* – изменение относительной площади сечений отсасывающей трубы.



$-\blacklozenge- -\ \gamma_U = -20^\circ$; $-\blacksquare- -\ \gamma_U = -10^\circ$; — $\gamma_U = 0^\circ$;

$-\square- -\ \gamma_U = +10^\circ$; $-\lozenge- -\ \gamma_U = +20^\circ$.

Рис. 7 – Распределение статического давления вдоль отсасывающей трубы: *а* – восстановление давления относительно значения на входном сечении; б – характер приращения статического давления в ОТ относительно варианта $\gamma_U = 0^\circ$.

На рис. 7, *а* показано изменение осредненного по площади статического давления (относительно величины давления на входе в ОТ, сеч. № 1) по сечениям при разных значениях навала лопастей РК. На рис. 7, *б* приведено изменение распределения давления в трубе относительно исходного варианта РК. Как видно, осевой навал лопасти не оказывает существенного влияния на характер графиков восстановления давления в ОТ. В диффузоре (сеч. 1 – 3) и в колене (сеч. 3 – 8) отличия минимальны, некоторые незначительные изменения происходит в отводящем диффузоре (сеч. 8 – 15).

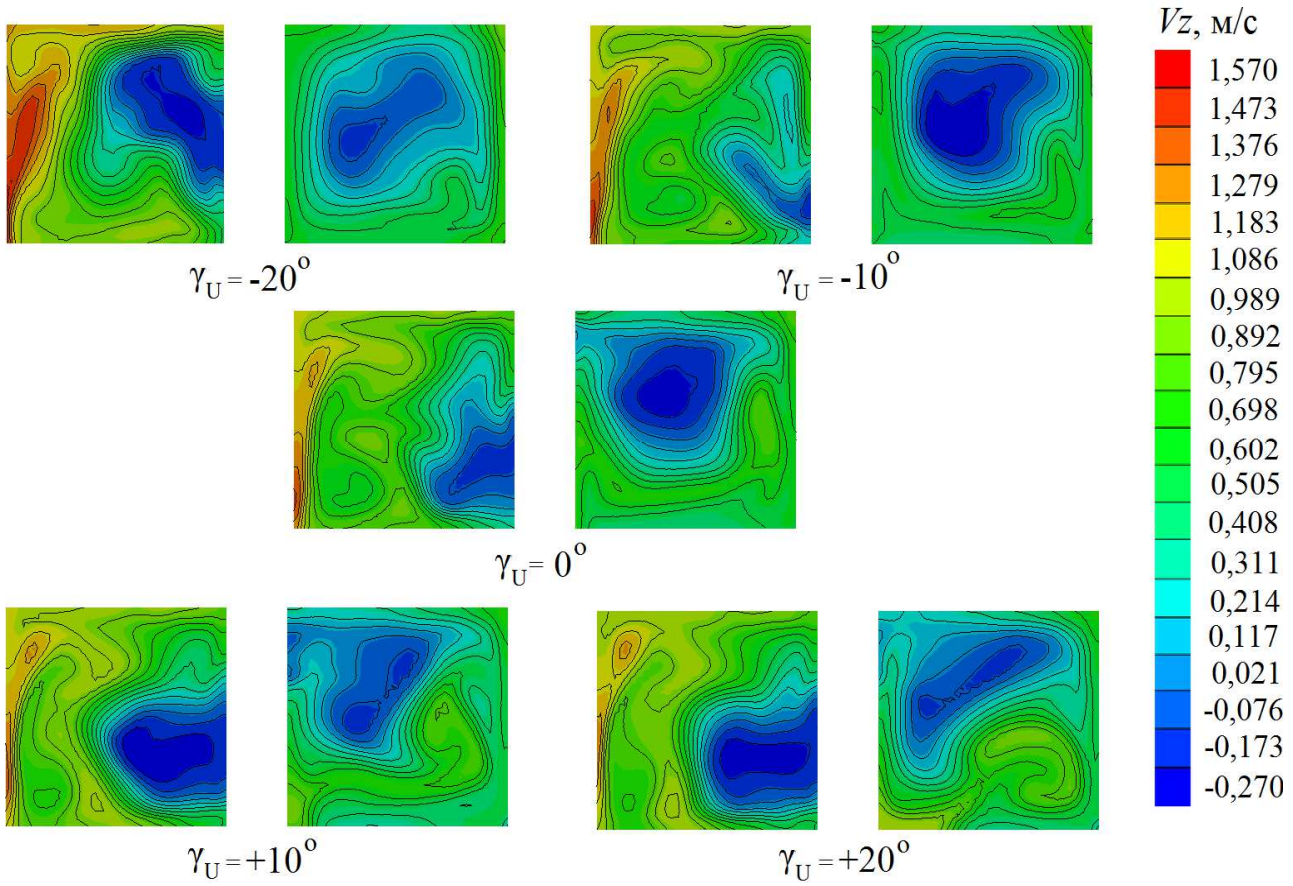


Рис. 8 – Изолинии расходной компоненты вектора скорости в выходном сечении отсасывающей трубы.

На рис. 8 приведено распределение изолиний расходной скорости в выходном сечении ОТ (сеч. 15) при разных значениях навалов лопастей РК. Как видно из рисунка, у всех вариантов ПЧ наблюдается заметная неравномерность распределения скорости – ее уровень в левом канале (по ходу течения) заметно выше, чем в правом. Во всех конструкциях на выходе из трубы присутствуют зоны с обратным течением причём, как в левом, так и правом канале. Максимальное значение скоростей наблюдается у левой стенки левого канала, ее уровень снижается при навале (то есть перемещении периферийного участка лопасти РК вниз по потоку).

Проведенные исследования дали возможность оценить зависимость энергетических показателей ПЧ от величины навала. На рис. 9 приведены зависимости потерь энергии в ОТ, относительных значений КПД, мощности и срабатываемого напора всей ПЧ от значения угла саблевидности. Под относительными КПД, мощностью и напором понимается отношение этого параметра в ПЧ с РК с навалами к соответствующим значениям исходного варианта ($\gamma_U = 0^\circ$) в процентах (кроме напора).

Минимум потерь энергии в отсасывающей трубе $h_{\text{ОТ}}$ получен у варианта ПЧ с РК при угле саблевидности $\gamma_U = +10^\circ$ и равен 1,82 %. В этой же ПЧ получено и максимальное значение относительного КПД: его повышение относительно исходного варианта составило 0,21 %.

Значения мощности и срабатываемого напора возрастают при смещении периферийного участка лопасти вниз по потоку. В оптимальной (с точки зрения значения КПД) ПЧ ($\gamma_U = +10^\circ$) в результате применения осевого навала удалось добиться повышения мощности более чем на 2,6 %.

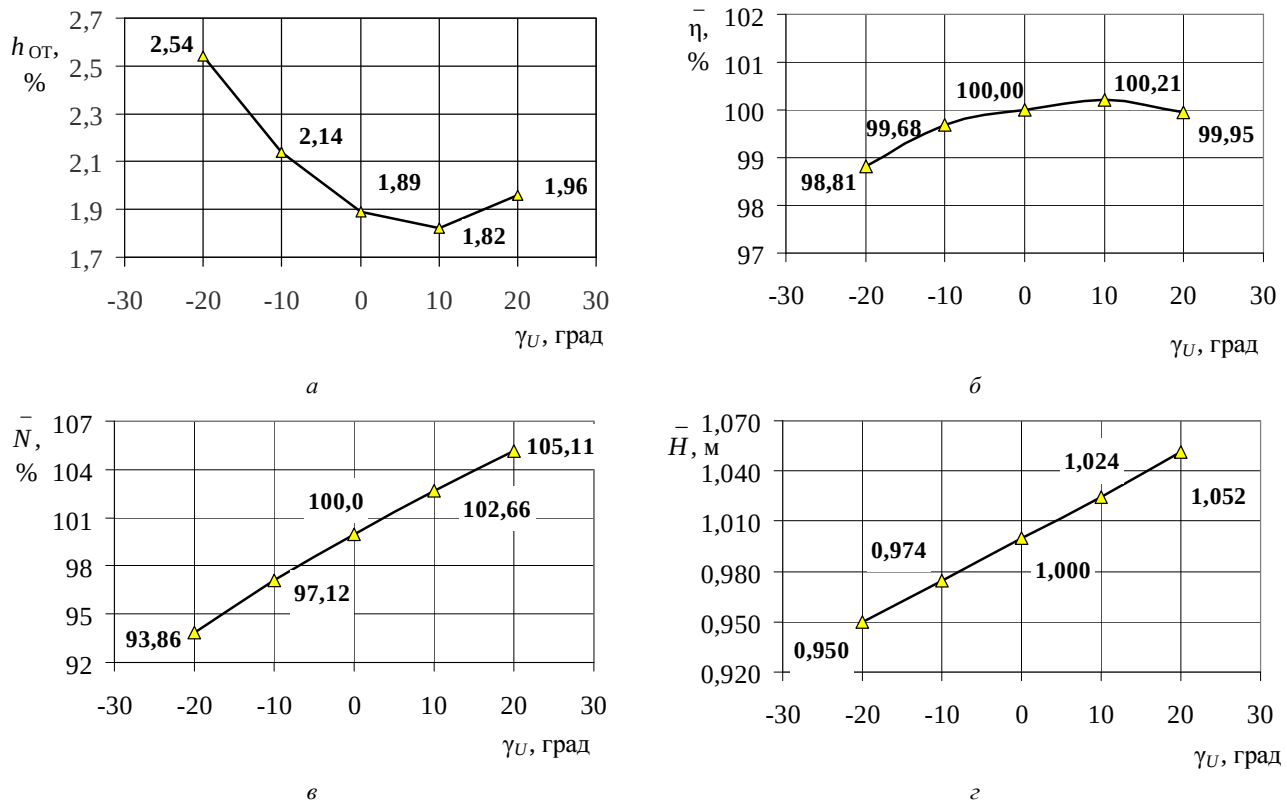


Рис. 9 – Зависимость энергетических показателей от величины навала лопастей РК:
а – потери в ОТ; *б* – КПД ПЧ; *в* – мощность; *г* – срабатываемый напор.

Выводы. Выполнено численное исследование влияния сложного осевого периферийного навала лопасти РК осевой гидротурбины ПЛ20 Кременчугской ГЭС на характеристики потока в проточной части. В результате установлено, что применение периферийного осевого навала:

– оказывает незначительное влияние на структуру потока в области за НА и перед РК и существенное – за РК на входе в ОТ;

– приводит к изменению вида эпюр давления на поверхностях лопасти РК, особенно в районе входных кромок;

– дает возможность выровнять распределение полного давления по ширине канала;

– оказывает влияние на структуру потока и потери в отсасывающей трубе;

– влияет на интегральные характеристики ПЧ: КПД, мощность, срабатываемый напор;

– позволило добиться повышения максимального значения КПД и мощности при оптимальном режиме работы современной высокоэффективной проточной части Кременчугской ГЭС.

В дальнейшем планируется провести исследования ПЧ с РК с одновременным применением окружных и осевых навалов в широком диапазоне режимов работы.

Список литературы

1. *Семенова А. В., Чирков Д. В., Скороспелов В. А.* Применение метода многоцелевой оптимизации для проектирования формы лопасти рабочего колеса поворотно-лопастной гидротурбины // Известия Самарского научного центра РАН. – 2013. – Т. 15. – № 4 (2). – С. 588 – 593.
2. *Русанов А. В., Волков Ю. П.* Влияние сложного навала рабочих и направляющих лопаток ЦВД паровой турбины на аэродинамические характеристики проточной части // Компрессорное и энергетическое машиностроение. – 2008. – Вып. 3 (13). – С. 93 – 97.
3. *Русанов А. В., Левченко Е. В., Швецов В. Л., Пащенко Н. В.* Влияние пространственного профилирования направляющих лопаток на газодинамические характеристики ЦНД паровой турбины // Двигатели и энергоустановки аэрокосмических летательных аппаратов. – 2010. – № 7 (74). – С. 65 – 70.
4. *Русанов А. В., Хореев О. Н., Линник А. В., Сухоребрый П. Н.* Влияние простого окружного навала лопастей рабочего колеса осевой гидротурбины ПЛ20 на гидродинамические характеристики проточной части // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Гідравлічні машини та гідроагрегати. – Х. : НТУ «ХПІ», 2015. – Вип. 3 (1012). – С. 8 – 12.
5. *Русанов А. В., Хореев О. Н., Линник А. В., Сухоребрый П. Н.* Влияние сложного окружного навала лопастей рабочего колеса осевой гидротурбины на структуру потока и энергетические характеристики проточной части // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія : Математичне моделювання в техніці та технологіях. – Харків : НТУ «ХПІ», 2015. – Вип. 18 (1127). – С. 130 – 141.
6. *Русанов А. В., Хореев О. Н., Косьянов Д. Ю., Сухоребрый П. Н., Рябова С. А.* Влияние пространственного профилирования лопастей рабочего колеса на характеристики потока в проточной части осевой гидротурбины // Вісник НТУ «ХПІ». Серія : Гідравлічні машини та гідроагрегати. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – Вип. 20 (1192). – С. 8 – 14.
7. *Русанов А. В., Линник А. В., Сухоребрый П. Н., Хореев О. Н., Рябов А. В.* Математическое моделирование течения жидкости и анализ характеристик потока в подводе гидротурбины ПЛ20 Кременчугской ГЭС // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія :

Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. – Харків : НТУ «ХПІ», 2014. – Вип. 1 (1044). – С. 41 – 48.

8. *Русанов А. В., Хореев О. Н., Линник А. В., Сухоребрый П. Н., Косьянов Д. Ю.* Численное исследование течения жидкости в проточной части гидротурбины ПЛ20 Кременчугской ГЭС // Вісник НТУ «ХПІ». Серія : Гідравлічні машини та гідроагрегати. – Харків: НТУ «ХПІ», 2015. – Вип. 45 (1154) 2015. – С. 9 – 15.

9. *Русанов А. В., Косьянов Д. Ю.* Численное моделирование течений вязкой несжимаемой жидкости с использованием неявной квазимонотонной схемы Годунова повышенной точности // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. − 2009. − №5. − С. 4 − 7.

10. *Русанов А. В., Ершов С. В.* Математическое моделирование нестационарных газодинамических процессов в проточных частях турбомашин // Монография. − Харьков : Ин-т пробл. машиностроения НАН Украины, 2008. − 275 с.

References (transliterated)

1. Semenova A. V., Chirkov D. V., Skorospelov V. A. Primenenie metoda mnogotselevoy optimizatsii dlya proektirovaniya formy lopasti rabochego kolesa povorotno-lopastnoy gidroturbiny [Application of multi-objective optimization method for designing shape of runner blade of Kaplan turbine]. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo centra RAN* [Reports of the Samara scientific center of RAS]. 2013, vol. 15, no. 4(2), pp. 588–593.

2. Rusanov A. V., Volkov Yu. P. Vliyanie slozhnogo navala rabochikh i napravlyayushchikh lopatok CVD parovoy turbiny na ayerodinamicheskie harakteristiki protochnoy chasti [The impact of the complex offset of the runner and the guid CVP blades of a steam turbine on the aerodynamic characteristics of the flow part]. *Kompressornoe i yenergeticheskoe mashinostroenie* [Compressor and energy mechanical engineering]. 2008, no. 3 (13), pp. 93–97.

3. Rusanov A. V., Levchenko E. V, Shvecov V. L., Pashchenko N. V. Vliyanie prostranstvennogo profilirovaniya napravlyayushchikh lopatok na gazodinamicheskie kharakteristiki CND parovoy turbiny [Influence of spatial profiling of guide blades on the gas-dynamic characteristics of steam turbine low pressure cylinder]. *Dvigateli i yenergoustanovki ayerokosmicheskikh letatel'nykh apparatov* [Engines and power plants of aerospace and flying machines]. 2010, no. 7 (74), pp. 65–70.

4. Rusanov A. V., Khorev O. N., Linnik A. V., Sukhorebryy P. N. Vliyanie prostogo okruzhnogo navala lopastey rabochego kolesa osevoy gidroturbiny PL20 na gidrodinamicheskie kharakteristiki protochnoy chasti [The influence of a simple circular offset of the runner blades of the Kaplan turbine PL20 upon hydrodynamic characteristics of the flow part]. *Visnyk NTU «KhPI». Seriya: Gidravlichni mashyny ta gidroagregaty* [Bulletin of the National Technical University “KhPI”. Series: Hydraulic Machines and Aggregates]. Kharkiv, NTU "KhPI" Publ., 2015, vol. 3 (1112), pp. 8–12.

5. Rusanov A. V., Khorev O. N., Linnik A. V., Sukhorebryy P. N. Vliyanie slozhnogo okruzhnogo navala lopastey rabochego kolesa osevoy gidroturbiny na strukturu potoka i yenergeticheskie kharakteristiki protochnoy chasti [The influence of the complex circular offset of the runner blades in Kaplan turbine upon the flow pattern and the hydrodynamic characteristics of the flow part]. *Visnyk NTU «KhPI». Seriya: Matematychne modelyuvannya v tekhnitsi ta tekhnologiyakh* [Bulletin of National Technical University «KhPI» Series: Mathematical modeling in engineering and technologies]. Kharkiv, NTU "KhPI" Publ., 2015, vol. 18 (1127), pp. 130–141.

6. Rusanov A. V., Khorev O. N., Kos'yanov D. Yu, Sukhorebryy P. N., Ryabova S. A. Vliyanie prostranstvennogo profilirovaniya lopastey rabochego kolesa na kharakteristiki potoka v protochnoy chasti osevoy gidroturbiny [Influence of spatial profiling of the runner blades on flow characteristics in the flow part of the Kaplan turbine]. *Visnyk NTU «KhPI». Seriya: gidravlichni mashyny ta gidroagregaty* [Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Hydraulic Machines and Aggregates]. Kharkiv, NTU "KhPI" Publ., 2016, vol. 20 (1192), pp. 8–14.

7. Rusanov A. V., Linnik A. V., Sukhorebryy P. N., Khorev O. N., Ryabov A. V. Matematicheskoe modelirovanie techeniya zhidkosti i analiz kharakteristik potoka v podvode gidroturbiny PL20 Kremenchugskoy GYES [Mathematical modeling of fluid flow and analysis of flow characteristics in input of hydroturbine PL20 by Kremenchugskaya HPP]. *Visnyk NTU «KhPI». Seriya: Energetychni ta teplotekhnichni protsesy y ustatkuvannya* [Bulletin of the National Technical University “KhPI”. Series: Energy and termochemical processes and devices]. Kharkiv, NTU "KhPI" Publ., 2014, vol. 1 (1044), pp. 41–48.

8. Rusanov A. V., Khorev O. N., Linnik A. V., Sukhorebryy P. N., Kos'yanov D. Yu. Chislennoe issledovanie techeniya zhidkosti v protochnoy chasti gidroturbiny PL20 Kremenchugskoj GYES [The numerical investigation of fluid flow in the flow part of the Kaplan turbine PL20 by Kremenchugskaya HPP**]**. *Visnyk NTU «KhPI». Seriya: Gidravlichni mashyny ta gidroagregaty* [Bulletin of the National Technical University “KhPI”. Series: Hydraulic Machines and Aggregates]. Kharkiv, NTU "KhPI" Publ., 2015, vol. 45 (1154), pp. 9–15.

9. Rusanov A. V., Kos'yanov D. Yu Chislennoe modelirovanie techeniy vyazkoy neszhimaemoy zhidkosti s ispol'zovaniem neyavnoy kvazimonotonnoy skhemy Godunova povyshennoy tochnosti [Numerical simulation of viscous incompressible fluid flow using an implicit quasi-monotone high accuracy Godunov type scheme]. *Vostochno.-Evropeyskiy zhurnal peredovykh tekhnologiy* [East-European Journal of Advanced Technologies]. 2009, no. 5, pp. 4−7.

10. Rusanov A. V., Ershov S. V. *Matematicheskoe modelirovanie nestatsionarnykh gazodinamicheskikh protsessov v protochnykh chastyakh turbomashin. Monografiya.* [Mathematical modeling of unsteady gas-dynamic processes in flow parts of turbomachines. Monograph]. Kharkov, In-t probl. Mashinostroeniya NAN Ukrayiny Publ., 2008. 275 p.

Поступила (received) 21.06.2016

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Вплив осьового навалу лопатей робочого колеса осьової гідротурбіни на характеристики течії в проточній частині / А. В. Русанов, О. М. Хорєв, Д. Ю. Косьянов, С. О. Рябова, П. М. Сухоребрий // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Математичне моделювання в техніці та технологіях. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – № 16 (1188). – С. 85 – 93. Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2222-0631.

Влияние осевого навала лопастей рабочего колеса осевой гидротурбины на характеристики течения в проточной части / А. В. Русанов, О. Н. Хорев, Д. Ю. Косьянов, С. А. Рябова, П. Н. Сухоребрый // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Математичне моделювання в техніці та технологіях. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – № 16 (1188). – С. 85 – 93. Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2222-0631.

The influence of the axial offset of the runner blades of Kaplan turbine on flow characteristics in the flow part / A. V. Rusanov, O. N. Khoryev, D. Yu. Kosianov, S. A. Riabova, P. N. Sukhorebryi // Bulletin of National Technical University «KhPI» Series: Mathematical modeling in engineering and technologies. – Kharkiv : NTU «KhPI», 2016. – № 16 (1188). – pp. 85 – 93. Bibliog.: 10 titles. – ISSN 2222-0631.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / Information about authors

Русанов Андрій Вікторович – член-кореспондент НАН України, доктор технічних наук, професор, заступник директора ІПМаш НАН України з наукової роботи, м. Харків; тел.: (057) 349-47-95; e-mail: rusanov@ipmach.kharkov.ua.

Русанов Андрей Викторович – член-корреспондент НАН Украины, доктор технических наук, профессор, заместитель директора ИПМаш НАН Украины по научной работе, г. Харьков; тел.: (057) 349-47-95; e-mail: rusanov@ipmach.kharkov.ua.

Rusanov Andrey Viktorovich – Corresponding Member of the National Academy of Sciences of Ukraine, Doctor of Technical Sciences, Professor, Deputy Director IPMach NAS of Ukraine for Science, Kharkiv; tel.: (057) 349-47-95; e-mail: rusanov@ipmach.kharkov.ua.

Хорєв Олег Миколайович – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, ІПМаш НАН України, м. Харків, старший науковий співробітник, м. Харків; тел.: (057) 349-47-91; e-mail: khorev@ipmach.kharkov.ua.

Хорев Олег Николаевич – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, ИПМаш НАН Украины, г. Харьков, старший научный сотрудник, г. Харьков; тел.: (057) 349-47-91; e-mail: khorev@ipmach.kharkov.ua.

Khoryev Oleg Nikolayevich – Candidate of Technical Sciences (Ph.D.), Senior Research Fellow, IPMach NAS of Ukraine, Kharkiv, Senior Researcher, Kharkiv; tel.: (057) 349-47-91; e-mail: khorev@ipmach.kharkov.ua.

Косьянов Дмитро Юрійович – кандидат технічних наук, докторант, ІПМаш НАН України, м. Харків; тел.: (057) 349-47-91; e-mail: kosyanov@ipmach.kharkov.ua.

Косьянов Дмитрий Юрьевич – кандидат технических наук, докторант, ИПМаш НАН Украины, г. Харьков; тел.: (057) 349-47-91; e-mail: kosyanov@ipmach.kharkov.ua.

Kosianov Dmitry Yurievich – Candidate of Technical Sciences (Ph.D.), doctorate, IPMach NAS of Ukraine, Kharkiv; tel.: (057) 349-47-91; e-mail: kosyanov@ipmach.kharkov.ua.

Рябова Світлана Олександрівна – інженер-конструктор гідротурбін ПАТ «Турбоатом», м. Харків; тел.: (057) 349-28-59; e-mail: office@turboatom.com.ua.

Рябова Светлана Александровна – инженер-конструктор гидротурбин ПАО «Турбоатом», г. Харьков; тел.: (057) 349-28-59; e-mail: office@turboatom.com.ua.

Riabova Svetlana Aleksandrovna – Design engineer of hydro turbines of PJSC «Turboatom», Kharkiv; tel.: (057) 349-26-59; e-mail: office@turboatom.com.ua.

Сухоребрий Петро Миколайович – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, ІПМаш НАН України, м. Харків; тел.: (0572) 94-17-06; e-mail: sukhor@ipmach.kharkov.ua.

Сухоребрый Петр Николаевич – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, ИПМаш НАН Украины, г. Харьков; тел.: (0572) 94-17-06; e-mail: sukhor@ipmach.kharkov.ua.

Sukhorebryi Petr Nikolayevich – Candidate of Technical Sciences (Ph.D.), Senior Research Fellow, IPMach NAS of Ukraine, Kharkiv; tel.: (0572) 94-17-06; e-mail: sukhor@ipmach.kharkov.ua.

УДК 519.23: 004.932.72’1

С. В. ХЛАМОВ, В. Е. САВАНЕВИЧ, А. Б. БРЮХОВЕЦКИЙ, С. С. ОРЫШИЧ

МЕТОД НАТУРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА ОБНАРУЖЕНИЯ ОКОЛОНУЛЕВОГО ВИДИМОГО ДВИЖЕНИЯ ОБЪЕКТА НА СЕРИИ CCD-КАДРОВ

Розроблено метод натурного моделювання дослідження показників якості виявлення близьконульового видимого руху об’єкта на серії CCD-кадрів. У якості натурних даних використовуються вимірювання положення об’єктів, включених у внутрішній каталог (ВК) об’єктів, нерухомих на серії кадрів. Даний метод враховує основні особливості процесу формування CCD-вимірювань положення об'єктів на кадрах і особливості натурного моделювання при використанні різних методів виявлення близьконульового видимого руху досліджуваного об’єкта на серії CCD-кадрів. Так само в роботі наведені результати дослідження показників якості виявлення об'єктів з близьконульовим видимим рухом розробленим методом натурного моделювання.

Ключові слова: серія CCD-кадрів, натурне моделювання, внутрішній каталог об’єктів, нерухомих на серії CCD-кадрів, показники якості виявлення близьконульового видимого руху об’єкта, МНК-оцінка параметрів видимого руху об’єкта, вимірювання положення об’єкта, f – критерій Фішера.

© С. В. Хламов, В. Е. Саваневич, А. Б. Брюховецкий, С. С. Орышич, 2016