

УДК 621.224

**А. В. РУСАНОВ, О. Н. ХОРЕВ, П. Н. СУХОРЕБРЫЙ, В. Н. ДЕДКОВ****РАЗРАБОТКА И РАСЧЕТНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОТОЧНОЙ ЧАСТИ НАСОС-ТУРБИНЫ ДЛЯ УСЛОВИЙ КАНЕВСКОЙ ГАЭС**

Представлено результати розроблення проточної частини радіально-осьової насос-турбіни підвищеної швидкохідності на напір до 120 м для умов Канівської ГАЕС. За допомогою програмного комплексу *IPMFlow* виконано чисельне дослідження просторової в'язкої течії рідини в решітках направляючого апарату і робочого колеса в турбінному режимі роботи. Проведено аналіз структури потоку і втрат енергії в цих елементах проточної частини при чотирьох значеннях витрати.

**Ключові слова:** насос-турбіна, проточна частина, просторова течія, структура потоку, втрати енергії.

Представлены результаты разработки проточной части радиально-осевой насос-турбины повышенной быстроходности на напор до 120 м для условий Каневской ГАЭС. С помощью программного комплекса *IPMFlow* выполнено численное исследование пространственного вязкого течения жидкости в решетках направляющего аппарата и рабочего колеса в турбинном режиме работы. Проведен анализ структуры потока и потерь энергии в этих элементах проточной части при четырех значениях расхода.

**Ключевые слова:** насос-турбина, проточная часть, пространственное течение, структура потока, потери энергии.

The results of the development of a flow part of radial-axial pump-turbine of high specific speed at head up to 120 m for the conditions of the Kanevskaya PSPP are presented. Profiling of the runner blade by method of solving the differential equation of the current streamlet in the plan has been carried out. A numerical study of the spatial viscous fluid flow in the computational domain including guide vanes and a runner in a turbine operating mode using the software program *IPMFlow* has been performed. The fluid flow simulation on basis of numerical integration of the Reynolds equations with an additional term containing artificial compressibility has been implemented. The differential two-parameter model of Menter (SST) has been applied to take into account turbulent effects. Numerical integration of the equations is carried out using an implicit quasi-monotone Godunov type scheme of second - order accuracy in space and time. The flow pattern and energy losses in these elements of flow part at four values of discharge has been analyzed.

**Keywords:** pump-turbine, flow part, spatial flow, flow structure, energy loss.

**Введение.** В мире основной технологией для регулирования и маневрирования мощностью энергосистем является гидроаккумулирующие электростанции (ГАЭС). По данным Международного энергетического агентства, в 2013 году доля ГАЭС среди всех накопителей энергии составляла 99 %, а ее суммарная мощность 141 ГВт. Мощность ГАЭС в европейских странах достигла 45 ГВт и продолжает увеличиваться – в Швейцарии строятся станции Linth-Limmern мощностью 1 ГВт и Nant de Drance мощностью 900 МВт, в Португалии – Venda Nova III мощностью 736 МВт и другие (<http://www.dsnews.ua/economics/bez-vody-nikak-pochemu-pri-dvizhenii-v-evropu-u-gaes-net-31082017100000>).

В Украине решить проблему с дефицитом регулирующих мощностей в Объединенной энергосистеме можно за счет введения в действие новых блоков ГАЭС. Это позволит снизить количество пусков блоков ТЭС, стабилизировать их нагрузки и повысить их КПД, а также сэкономить газ и электроэнергию, что очень актуально в украинских реалиях. Годовой эффект от использования только одного гидроагрегата Днестровской ГАЭС мощностью 324 МВт составляет в среднем \$ 35 млн. В использовании ГАЭС является и экологический плюс – эксплуатация трех гидроагрегатов Днестровской ГАЭС сокращает выбросы диоксида углерода на 180 тыс. т в месяц, SO<sub>2</sub> на 2,3 тыс. т, а пыли на 700 т.

При этом гидроэнергетика, как один из видов возобновляемой низкоуглеродистой энергетики, отвечает природоохранным директивам ЕС и поддерживается Парижским соглашением по климату, которое Украина подписала в апреле 2016 года.

Ввод в эксплуатацию второй очереди

Днестровской ГАЭС (4 гидроагрегата) увеличит ее суммарную мощность до 2268 МВт, а доля маневренных мощностей в ОЭС Украины вырастет на 4,35 %. Разработка и введение в эксплуатацию четырех агрегатов Каневской ГАЭС суммарной мощностью в генерирующем режиме 1000 МВт увеличит долю маневренных мощностей еще на 1,92 %. Таким образом, ввод в эксплуатацию двух указанных ГАЭС повысит долю маневровых мощностей до 15-16 % от суммарной, что соответствует требованиям надежной работы ОЭС.

Создание эффективного гидротурбинного оборудования для ГАЭС является важной научно-технической проблемой, для решения которой необходимо разрабатывать и совершенствовать современные методы расчета, исследования и анализа рабочего процесса в насос-турбинах.

В статье представлены результаты разработки проточной части радиально-осевой насос-турбины повышенной быстроходности на напор до 120 м для условий Каневской ГАЭС. Строительство этого объекта предусмотрено Программой развития гидроэнергетики Украины на период до 2026 года, утвержденной Кабинетом Министров 13 июля 2016 г. № 552-р.

Приведены результаты численного исследования пространственного вязкого течения жидкости в решетках направляющего аппарата (НА) и рабочего колеса (РК) в турбинном режиме работы. Выполнен анализ структуры потока и потерь энергии в этих элементах проточной части при четырех значениях открытия НА и расхода.

**1. Параметры проточной части.** Проточная часть радиально-осевой насос-турбины Каневской

ГАЭС разрабатывалась с учетом выполненных ранее в ИПМаш НАН Украине расчетных и экспериментальных исследований на гидродинамических стендах моделей радиально-осевых насос-турбины, в том числе и для Днестровской и модернизированной Киевской ГАЭС [1].

В соответствии с техническим заданием насос-турбины Каневской ГАЭС проектировались на следующие основные параметры:

Частота вращения, $\text{мин}^{-1}$	150
Напор расчетный в турбинном режиме, м:	95
Напоры расчетный в насосном режиме, м:	106,5
Мощность в турбинном режиме, МВт	250
Мощность в насосном режиме, МВт	$\approx 240$
Подача, $\text{м}^3/\text{с}$	236,1
Высота всасывания, м	-17,5

Проточная часть насос-турбины Каневской ГАЭС состоит из спиральной камеры, статора, НА, РК и отсасывающей трубы.

Спиральная камера с круглыми меридиональными сечениями, рассчитанными по закону  $V_u = \text{const}$ , где  $V_u$  – окружная составляющая скорости потока. Угол охвата в плане спирали  $\varphi_{\text{сп}} = 360^\circ$ . Скоростной коэффициент во входном сечении спирали  $K = V_{\text{вх}}/H_{T \text{ расч}} = 0,97$ , где  $V_{\text{вх}}$  – скорость потока во входном сечении спирали, а  $H_{T \text{ расч}}$  – расчетный напор в турбинном режиме [2].

Решетка статора состоит из 20 колонн, включая зуб спирали. Профиль колонны небольшой положительной кривизны. Радиальный НА состоит из 20 лопаток положительной кривизны, высотой  $b_0 = 0,25D_1$  (где  $D_1$  – диаметр РК). Диаметр расположения осей поворота лопаток  $D_0 = 1,2D_1$ . Распределение толщины по скелетной линии профиля принято как у профиля лопатки Днестровской ГАЭС [3]. Расчет, профилирование и исследование решетки статора и НА выполнено с использованием комплекса программ, разработанных в ИПМаш НАН Украины [4].

Выбор расчетных параметров насос-турбин, построение очертаний проточной части в меридиональной проекции, и проектирование рабочего колеса выполнены с учетом рекомендаций [5, 6, 7]. В качестве расчетных режимных параметров выбраны приведенный расход  $Q_1' = 620 \text{ л/с}$  и приведенная частота вращения  $n_1 = 82 \text{ мин}^{-1}$  в турбинном режиме.

Рабочее колесо имеет девять лопастей  $z_1 = 9$ , угол охвата лопасти в плане на периферии  $\varphi = 85,5^\circ$ . Диаметр горловины РК  $D_{\text{вх}} = 0,85D_1$ , угол наклона напорной кромки лопасти –  $40^\circ$ . Профилирование лопасти РК проведено методом решения дифференциального уравнения линии тока в плане

$d\theta = \frac{ds}{r \text{tg}\beta}$ . Полный угол охвата  $\theta$  определяется

интегралом  $\theta = \int_{r_1}^{r_2} \frac{ds}{r \text{tg}\beta}$ . Принимая во внимание, что

установить аналитическую зависимость между углом

лопасти  $\beta_{li}$  и радиусом  $r_i$  нет возможности, приведенный выше интеграл решается методом численного интегрирования.

Отсасывающая труба выполнена с коленом типа КУ-ЗРО и габаритными размерами: высота  $h = 3,15D_1$ , длина  $l = 4,5D_1$ .

Для разработанной проточной части насос-турбины проведены численные исследования течения жидкости в расчетной области, включающей НА и РК, в турбинном режиме работы. Исследования выполнены с помощью программного комплекса *IPMFlow*, позволяющего моделировать пространственные вязкие течения несжимаемой жидкости в проточных частях гидромашин.

**2. Математическая модель.** В программном комплексе *IPMFlow* моделирование течения вязкой несжимаемой жидкости в проточной части гидромашин выполнено на основе численного интегрирования уравнений Рейнольдса с дополнительным членом, содержащим искусственную сжимаемость. Для учета турбулентных эффектов применяется дифференциальная двухпараметрическая модель турбулентности *SST* Ментера. Численное интегрирование уравнений проводится с помощью неявной квазилинейной схемы Годунова второго порядка точности по пространству и времени.

Дискретизация исследуемой проточной части выполнена с помощью неструктурированной сетки с шестигранными ячейками. Число ячеек в одном межлопаточном канале в решетке НА – 415 тыс., а в одном межлопаточном канале в решетке РК – 829 тыс.

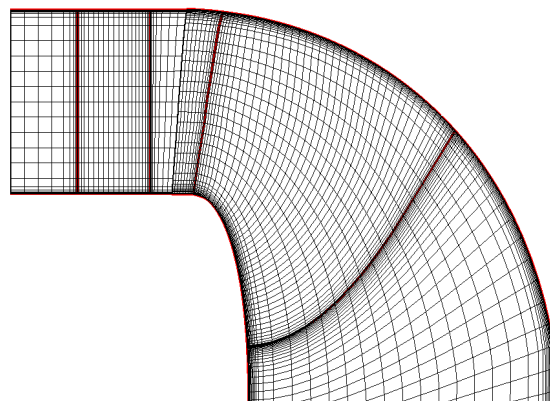


Рис. 1 – Расчетная сетка в области НА и РК, меридиональная проекция

Условия, задаваемые на границах расчетной области:

- на входе в решетке НА – вектор скорости потока, соответствующий необходимому расходу;
- на стенке – условие прилипания (скорость равна нулю);
- на выходе из канала решетки РК – статическое давление.

Подробное описание математической модели и численного метода представлено в работах [8, 9].

Численные исследования проведены для модели с диаметром РК  $D_1 = 1 \text{ м}$  при напоре  $H = 1 \text{ м}$  для четырех положений открытия НА и соответствующих

им прогнозным значениям приведенного расхода  $Q_1'$  и частоты вращения  $n_1'$  (табл. 1).

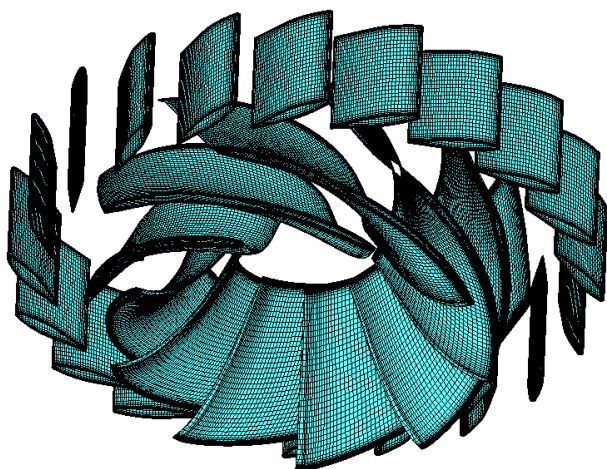


Рис. 2 – Расчетная сетка на лопатках НА и лопастях РК исследуемой проточной части

Таблица 1. – Режимные параметры при расчетных исследованиях

Параметры	Режимы			
	1	2	3	4
$a_0$ , мм	46	54	62	70
$Q_1'$ , л/с	450	550	620	700
$n_1'$ , мин <sup>-1</sup>	82	82	82	82

**3. Результаты расчетного исследования.** На рис. 3 приведено распределение скорости потока в области НА и РК в меридиональной проекции при разных значениях ширины канала: среднего сечения (50 % ширины канала), вблизи стороны разрежения (10 %) и давления лопасти (90 %) при значении расхода  $Q_1' = 620$  л/с приведено на рис. 3.

Как видно из рисунка, значения скорости потока в РК по ширине канала возрастает от втулки к периферии. При повороте потока от радиального

направления к осевому вблизи стороны разрежения лопасти наблюдается небольшая область снижения значений скорости. По ширине канала эта область незначительна и уже в средней части канала (50 %) практически отсутствует. На стороне давления лопасти (90 %) в районе напорной кромки имеются зоны с пониженным уровнем скорости.

Распределение скорости потока в области НА и РК в тангенциальных сечениях во втулочной области (10 % высоты канала), в середине канала (50 %) и периферийной зоне (90 %) при расходе  $Q_1' = 620$  л/с приведено на рис. 4. Распределение скорости в среднем сечении достаточно равномерное. Более высокий уровень скоростей наблюдается в периферийной зоне. На периферии, на стороне разрежения, в области за напорной кромкой наблюдается зона с пониженным уровнем скоростей.

Обтекание решетки НА при оптимальном открытии  $a_0 = 62$  мм как по ширине канала (рис. 3), так и по высоте (рис. 4) безотрывное.

Характеристики потока за РК на входе в отсасывающую трубу в виде распределения меридиональной  $V_m$  и окружной  $V_u$  составляющих скорости для оптимального значения расхода  $Q_1' = 620$  л/с, представлены на рис. 5.

Меридиональная (расходная)  $V_m$  составляющая скорости потока практически постоянна по ширине канала, ее значения несколько снижаются только в области втулки и периферии. Значения окружной составляющей скорости, характеризующей сработку циркуляции потока в РК, в середине канала близки к нулю, а в области втулки и в больше степени на периферии наблюдается положительная закрутка потока.

Изменение потерь энергии в решетках НА и РК при четырех расчетных значениях расхода представлено на рис. 6. В НА потери энергии с увеличением открытия уменьшаются, так как уменьшается значение скорости потока. При расчетном режиме  $Q_1' = 620$  л/с потери в НА равны 1,6 %. В РК потери энергии с увеличением открытия растут, их значение при расчетных режимных параметрах составляет 2,3 %.

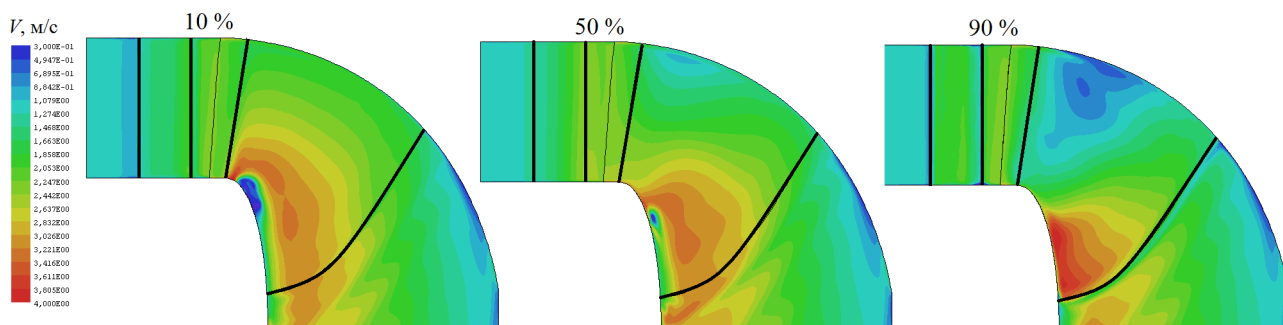


Рис. 3 – Распределение скорости потока в области НА и РК в меридиональной проекции при оптимальном значении расхода  $Q_1' = 620$  л/с.

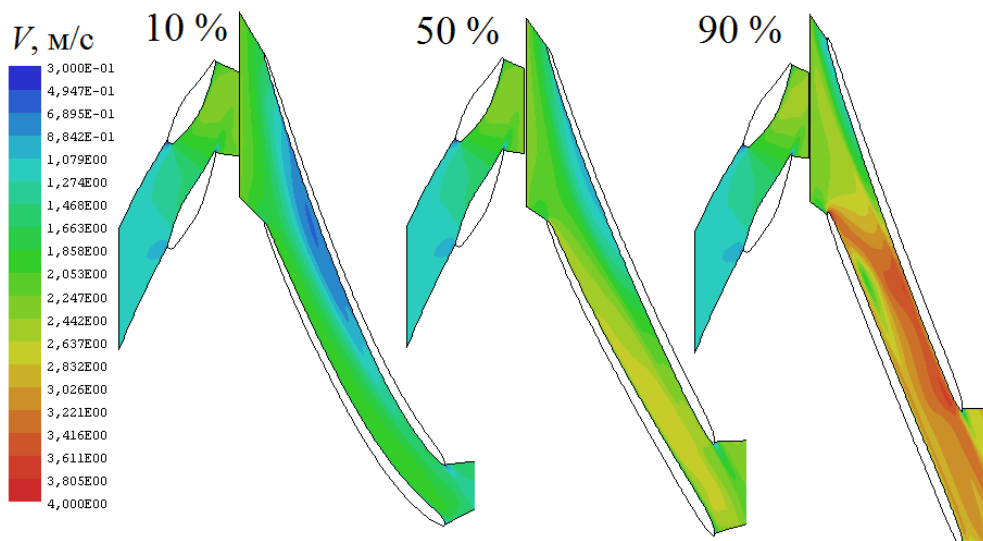


Рис. 4 – Распределение скорости потока  $V$  в области НА и РК в тангенциальном сечении при оптимальном значении расхода  $Q_1' = 620$  л/с.

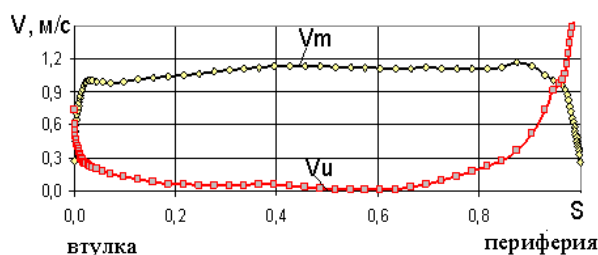


Рис. 5 – Распределение меридиональной  $V_m$  и окружной  $V_u$  составляющих скорости потока за РК

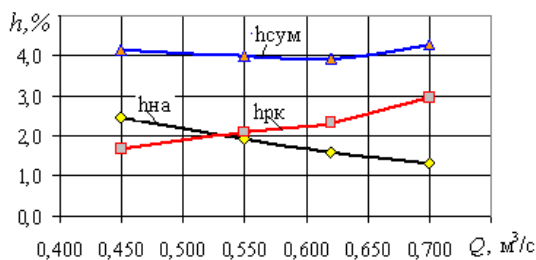


Рис. 6 – Потери энергии в направляющем аппарате и рабочем колесе

Минимальные суммарные потери энергии в расчетной области, включающей НА и РК, получены при расходе  $Q_1' \approx 620$  л/с, что полностью соответствует расчетным параметрам при проектировании РК насос-турбины, и равны 3,9 %.

**Выводы.** Для условий Каневской ГАЭС на напор до 120 м разработана проточная часть радиально-осевой насос-турбины повышенной быстроходности.

Выполненное численное исследование течения жидкости в решетках НА и РК в турбинном режиме работы позволило получить данные о структуре пространственного потока и гидравлических потерях,

свидетельствующих о высоких энергетических качествах разработанной проточной части. В оптимуме потери в НА равны 1,6 %, в РК – 2,3 %. Минимальные суммарные потери энергии в расчетной области получены при расходе  $Q_1' \approx 620$  л/с и равны 3,9 %.

**Список литературы**

1. Агибалов Е. С. Разработка и исследование моделей обратимой гидромашинны для Днестровской ГАЭС / Е. С. Агибалов, Б. К. Вапник, И. С. Веремеенко [и др.] // Проблемы машиностроения. – 1994. – вып. 40. – С. 8–12.
2. Сухоробрый П. Н. Расчет спиральных камер радиально-осевых обратимых гидромашин / П. Н. Сухоробрый // Вісник НТУ «ХПИ» Сер.: Гідравлічні машини та гідроагрегати. – 2001. – вып. 129, Ч 1.1. – С. 79–89.
3. Сухоробрый П. Н. Оценка влияния параметров статора и направляющего аппарата на энергетические характеристики радиально-осевых обратимых гидромашин / П. Н. Сухоробрый // Проблемы машиностроения. – 2003. – Т. 6, № 2, – С. 107–112.
4. Сухоробрый П. Н. Комплекс программ по расчету, профилированию и исследованию решетки направляющего аппарата гидротурбин и обратимых гидромашин / П. Н. Сухоробрый, Л. Л. Меньшикова // Проблемы машиностроения. – 2002. – Т. 5, № 2. – С. 33–40.
5. Дедков В. Н. Определение расчетных параметров обратимых гидромашин для диапазона напоров  $H=70-700$  м // Проблемы машиностроения. – 2008. – Т. 11, № 1. – С. 7–11.
6. Гнесин В. И. Комплекс программ для расчета радиально-осевых рабочих колес гидромашин / В. И. Гнесин, В. Н. Дедков, О. Н. Хореев // Проблемы машиностроения. – 2007. – Т. 10, № 2, С. 9–14.
7. Дедков В. Н. Автоматизация профилирования рабочих колес радиально-осевых гидротурбин / В. Н. Дедков, О. Н. Хореев // Вісник НТУ «ХПИ». – 2002. – Т. 10, № 9. – С. 29–35.
8. Русанов А. В. Численное моделирование течений вязкой несжимаемой жидкости с использованием неявной квазилинейной схемы Годунова повышенной точности / А. В. Русанов, Д. Ю. Косьянов // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2009. – № 5. – С. 4–7.
9. Русанов А. В. Математическое моделирование нестационарных газодинамических процессов в проточных частях турбомашин / А. В. Русанов, С. В. Еришов. – X: Ин-т пробл. машиностроен. НАН Украины, 2008. – 275 с.

## References (transliterated)

1. Agibalov, E. S., B. K. Vapnik, I. S. Veremeenko, et al. "Development and study of models of a reversible hydraulic machine for the Dniester PSPP." *Probl. mashinostroyeniya* 40 (1994): 8–12. Print.
2. Sukhorebryy, P. N. "Raschet spiral'nykh kamer radial'no-osevykh obratimnykh gidromashin" *Visnyk NTU "KhPI" Ser.: Gidravlichni mashini ta gidroagregati*. No. 129.1. Kharkiv: NTU "KhPI", 2001. 79–89. Print.
3. Sukhorebryy, P. N. "Otsenka vliyaniya parametrov statora i napravlyayushchego apparata na energeticheskiye kharakteristiki radial'no-osevykh obratimnykh gidromashin" *Probl. mashinostroyeniya* 6.2 (2003): 107–112. Print.
4. Sukhorebryy, P. N. and L. L. Men'shikova "Kompleks programm po raschetu, profilirovaniyu i issledovaniyu reshetki napravlyayushchego apparata gidroturbin i obratimnykh gidromashin." *Probl. mashinostroyeniya* 5.2 (2002): 33–40. Print.
5. Dedkov, V. N. "Opredeleniye raschetnykh parametrov obratimnykh gidromashin dlya diapazona naporov  $H = 70-700$  m" *Probl. mashinostroyeniya* 11.1 (2008): 7–11. Print.
6. Gnesin, V. I., V. N. Dedkov, and O. N. Khorev "Kompleks programm dlya rascheta radial'no-osevykh rabochikh koles gidromashin." *Probl. mashinostroyeniya* 10.2 (2007): 9–14. Print.
7. Dedkov V.N. and O. N. Khorev "Avtomatizatsiya profilirovaniya rabochikh koles radial'no-osevykh gidroturbin." *Visnyk NTU "KhPI"*. No 9.10. 2002. 29–35. Print.
8. Rusanov A. V. and D. Yu Kos'janov "Chislennoe modelirovanie techeniy v yazkoy neszhimaemoi zhidkosti s ispol'zovaniem neyavnoy kvazimonotonnoy skhemy Godunova povyshennoy tochnosti." *Vostochno-Evropejskij zhurnal peredovykh tehnologij* 5 (2009): 4–7. Print.
9. Rusanov, A. V. and S. V. Ershov *Matematicheskoe modelirovanie nestatsionarnykh gazodinamicheskikh protsessov v protochnykh chastyakh turbomashin*. Kharkov: In-t probl. mashinostroen. NAN Ukrainy, 2008. Print.

Поступила (received) 15.04.2018

## Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

**Разработка и расчетное исследование проточной части насос-турбины для условий Каневской ГАЭС / А. В. Русанов, О. Н. Хорев, П. Н. Сухоробрый, В. Н. Дедков** // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Гідравлічні машини та гідроагрегати. – Х. : НТУ «ХПІ», 2018. – № 17 (1293). – С. 4–8. – Бібліогр.: 9 назв. – ISSN 2411-3441 (print), ISSN 2523-4471 (online).

**Разработка и расчетное исследование проточной части насос-турбины для условий Каневской ГАЭС / А. В. Русанов, О. Н. Хорев, П. Н. Сухоробрый, В. Н. Дедков** // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Гідравлічні машини та гідроагрегати. – Х. : НТУ «ХПІ», 2018. – № 17 (1293). – С. 4–9. – Библиогр.: 9 назв. – ISSN 2411-3441 (print), ISSN 2523-4471 (online).

**Development and design study of the flow part of the pump turbine for the conditions of the Kaniv PSPP / A. V. Rusanov, O. N. Khoryev, P. N. Sukhorebryi, V. N. Dedkov** // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Hydraulic machines and hydrounits. – Kharkov : NTU "KhPI", 2018. – No. 17 (1293). – P. 4–9. – Bibliogr.: 9. – ISSN 2411-3441 (print), ISSN 2523-4471 (online).

## Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

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

**Русанов Андрей Викторович** – член-кореспондент НАН Украины, доктор технических наук, профессор, директор ИПМаш НАН Украины 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, Full Professor, Director IPMach NAS of Ukraine, Kharkov, tel.: (057) 349-47-95; e-mail: rusanov@ipmach.kharkov.ua.

**Хорев Олег Миколайович** – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, ІПМаш НАН України, 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, 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, Senior Research Fellow, Kharkov; tel.: (057) 349-47-91; e-mail: khorev@ipmach.kharkov.ua.

**Сухоробрый Петро Миколайович** – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, ІПМаш НАН України, старший науковий співробітник, м. Харків; тел.: (057) 349-47-70; e-mail: sukhor@ipmach.kharkov.ua.

**Сухоробрый Петр Николаевич** – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, ИПМаш НАН Украины, старший научный сотрудник, г. Харьков; тел.: (057) 349-47-70; e-mail: sukhor@ipmach.kharkov.ua.

**Sukhorebryi Petr Nikolayevich** – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Senior Research Fellow, IPMach NAS of Ukraine, Senior Research Fellow, Kharkov; tel.: (057) 349-47-70; e-mail: sukhor@ipmach.kharkov.ua.

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

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

**Dedkov Valery Nikolayevich** – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Senior Research Fellow, IPMach NAS of Ukraine, Senior Research Fellow, Kharkov; tel.: (057) 349-47-91; e-mail: dedkov@ipmach.kharkov.ua.