

УДК 621.224

**В. Э. ДРАНКОВСКИЙ, М. Ю. ХАВРЕНКО****АНАЛИЗ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА В РАБОЧИХ КОЛЕСАХ ВЫСОКОНАПОРНЫХ ОБРАТИМЫХ РАДИАЛЬНО-ОСЕВЫХ ГИДРОМАШИН**

Проведено анализ рабочего процесса в рабочих колесах высоконапорных обратимых гидромашин на напоры 300, 500 та 700 метрів в насосном режиме работы. Побудовані 3D моделі робочих коліс для відповідних напорів. Під час дослідження були визначені тиск та швидкість в проточній частині робочого колеса, що наведені в роботі в графічному вигляді. Отримані графічні залежності напору та ККД від витрат. Розрахунки проведені для п'яти значень подач.

**Ключові слова:** оборотна гідромашина, робоче колесо, проточна частина, коефіцієнт корисної дії, просторова течія, чисельне дослідження.

Проведен анализ рабочего процесса в рабочих колесах высоконапорных обратимых гидромашин на напоры 300, 500 и 700 метров в насосном режиме работы. Построены 3D модели рабочих колес на соответствующие напоры. В ходе исследования были определены давления и скорости в проточной части рабочих колес и представлены в работе графическом виде. Получены графические зависимости напора и КПД от расхода. Расчеты проведены для пяти значений подач.

**Ключевые слова:** обратимая гидромашина, рабочее колесо, проточная часть, коэффициент полезного действия, пространственное течение, численное исследование.

There have been designed and constructed 3D models of high-pressure reversible hydraulic machines. For the calculation have been constructed design grids. The minimum number of cells amounted to 5,2 million. Using a OpenFOAM software package. Have been done the numerical calculation of the spatial flow of a viscous fluid in impellers of hydraulic machines for pump mode. In the course of researches have been determined distribution of velocity and pressure in the flowing part. Represented dependence of efficiency and rated head from flow rate. Also have been determined the flow angles  $\beta_2$  and  $\alpha_2$  and velocities  $w_1$  and  $w_2$  that characterize the motion of the fluid in the flowing part of impeller. Have been analyzed the results of the calculations.

**Keywords:** reversible hydraulic machine, impeller, flowing part, efficiency, spatial flow, numerical calculation.

**Введение.** Тенденция зарубежного опыта гидромашиностроения показывает, что доля высоконапорных ГАЭС увеличивается. Эта тенденция обусловлена экономическими соображениями, т.к. при одинаковых мощностях, вес высоконапорной насос-турбины меньше, примерно в 1,5 раза, чем у низконапорной, а вес всего агрегата уменьшается примерно в 1,3 раза. При этом существенно уменьшаются площади водохранилища, что снижает затраты на строительство станции. Поэтому, данная тенденция является перспективной, в связи с чем возникает необходимость разработки нового и совершенствования существующего оборудования для высоконапорных ГАЭС.

**Цель работы.** При дальнейшем повышении эффективности работы высоконапорных обратимых гидромашин, необходимо проводить исследования, основанные на применении численного моделирования течения в каждом элементе их проточных частей. Эти исследования позволяют существенно сократить объем дорогостоящих модельных испытаний при проектировании новых проточных частей с учетом условий конкретных ГАЭС либо модернизации существующих, ранее сооруженных [1]. В данной работе осуществляется анализ рабочего процесса в рабочих колесах высоконапорных обратимых гидромашин на напоры 300, 500 и 700 метров в насосном режиме работы

методом пространственного расчета потока вязкой жидкости. Расчеты проводятся в программном комплексе *OpenFOAM*, апробация которого осуществляется в работе [2].

**Подготовка данных к расчету.** Основные данные для проектирования рабочих колес были получены по рекомендациям работ [3, 4, 5], которые базируются на положении, что насосный режим является определяющим. В табл. 1 представлены основные данные для проектирования рабочих колес. Профилирование лопасти осуществлялось методом конформного отображения на боковую поверхность цилиндра, который является простым и в то же время достаточно точным методом. Построение 3D модели колеса является достаточно сложным и трудоемким процессом, что связано с изгибом лопасти во всех трех плоскостях. Натурный диаметр рабочих колес составлял более трех метров, что сильно усложняло процесс исследования из-за очень большого необходимого количества ячеек расчетной сетки. Поэтому, рабочие колеса проектировались на приведенные величины для напорного диаметра один метр. После пересчета, расчетные напоры составили 18,8, 36,3 и 54,2 м соответственно. Количество оборотов соответствует данным табл. 1, а именно 375, 500 и 600 соответственно. На рис. 1 представлены 3D модели спроектированных рабочих колес.

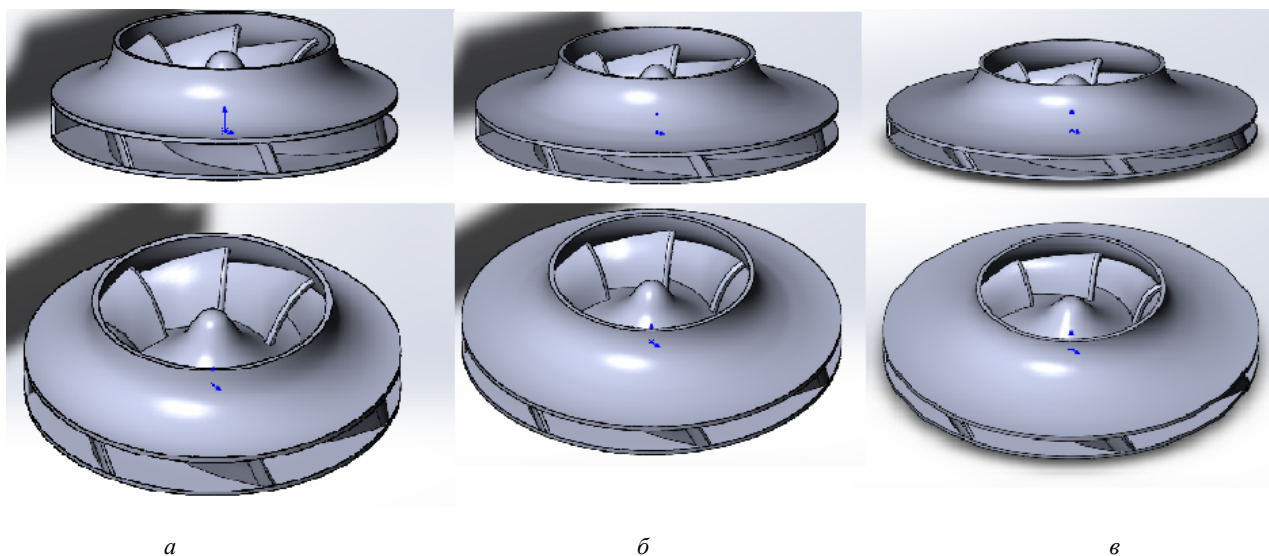
Таблица 1 – Основные данные для проектирования рабочих колес (насосный режим работы)

Параметры \ Напор	$H=300$	$H=500$	$H=700$
$n_{сн}$	136	99	83
$n$ , мин <sup>-1</sup>	375	500	600
$n_1$ , мин <sup>-1</sup>	86,3	82,98	81,5

© В. Э. Дранковский, М. Ю. Хавренко, 2017

Продолжение таблицы 1

Параметры	Напор	Продолжение таблицы 1		
		$H=300$	$H=500$	$H=700$
$Q_1, \text{ м}^3/\text{с}$		0,179	0,107	0,078
$D_2, \text{ м}$		1	1	1
$b_2, \text{ мм}$		101	65	51
$D_0, \text{ м}$		0,604	0,516	0,478
$\beta_{1л}, \text{ град.}$ (от втулки к ободу на пяти линиях тока)		30°, 26°, 22,6°, 20,1°, 18°	27,6°, 25,8°, 23,4°, 21°, 19°	27°, 25,6°, 23,9°, 22°, 20°
$\beta_{2л}, \text{ град.}$		31,5°	30,5°	27,3°
$\Theta, \text{ град.}$ (угол охвата лопасти)		105°	110°	115°
$z$ (кол-во лопастей)		7	7	7

Рис. 1 – 3D модели рабочих колес на быстроходности: а –  $n_{\text{ш}}=136$ ; б –  $n_{\text{ш}}=99$ ; в –  $n_{\text{ш}}=83$ 

**Численное исследование.** Первым этапом проведения численного исследования является построение расчетной сетки, которая состоит из нескольких миллионов ячеек. Для всех рабочих колес была построена неструктурированная расчетная сетка. Для колеса с быстроходностью  $n_{\text{ш}}=136$  количество ячеек составило 5,2 млн., для  $n_{\text{ш}}=99$  – 5,9 млн. и для  $n_{\text{ш}}=83$  – 5,3 млн. ячеек. Количество призматических слоев для первых двух колес равно 16, а для самого тихоходного – 15. Значение  $y^+$  находится в пределах 50–60 единиц. Давление на выходе задано величиной в 1 атм. На рис. 2 изображена расчетная сетка для рабочего колеса с быстроходностью 99, где выделены призматические слои. Расчеты велись для 5 режимов подач в насосном режиме и выполнялись для расчетной области охватывающей проточную часть всего рабочего колеса.

В ходе исследований, по результатам работы программы, были определены значения абсолютного и статического давления в проточной части рабочих колес. По разнице давлений на выходе и входе из рабочего колеса определялся напор по формуле:

$$H_{\text{н}} = \frac{P'_{\text{вых}} - P'_{\text{вх}}}{\rho g} \quad (1)$$

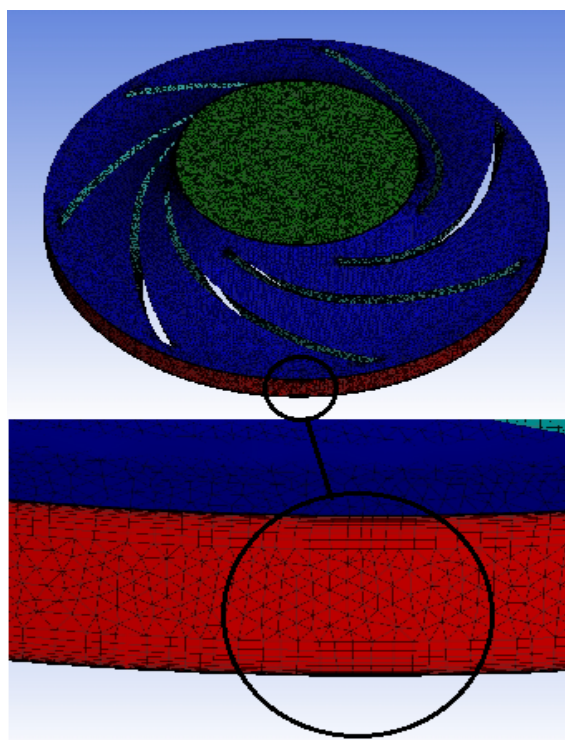


Рис. 2 – Расчетная сетка с выделенными призматическими слоями

Разница расчетных напоров и напоров, которые получены в результате численного эксперимента составляет менее 1% что можно считать хорошим результатом. Зависимость напора от расхода представлена на рис. 3 для диаметра 1 м.

Был определен крутящий момент лопасти и гидравлический КПД рабочего колеса по формуле:

$$\eta_{г.р.к.} = \frac{\rho g Q H}{\omega M_{кр}} \quad (2)$$

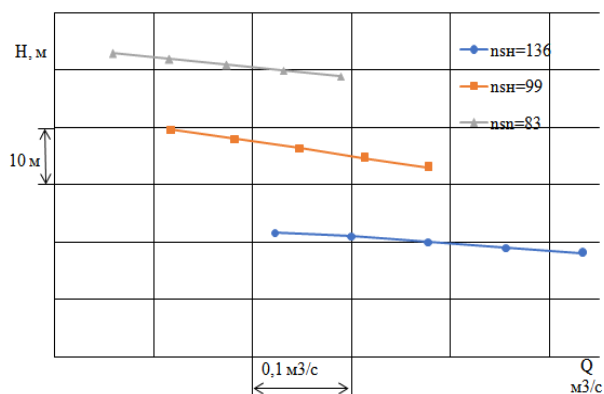


Рис. 3 – Напорная характеристика исследуемых рабочих колес

Зависимость гидравлического КПД рабочего колеса от расхода представлена на рис. 4.

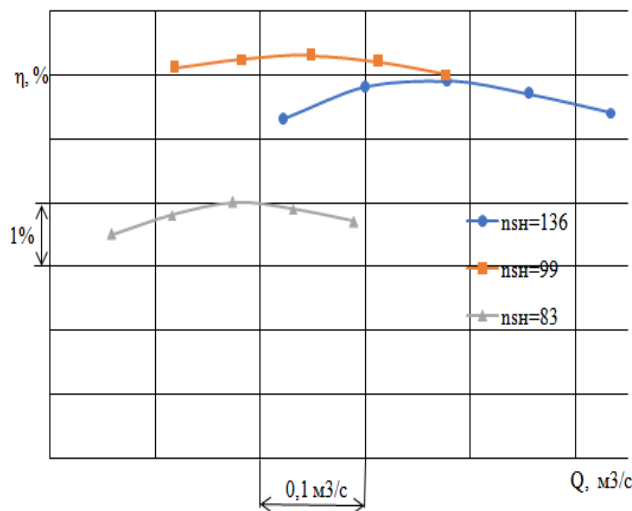


Рис. 4 – Энергетическая характеристика исследуемых рабочих колес

На рис. 5 и 6 графически представлены распределения абсолютного и статического давления в горизонтальном сечении исследуемых рабочих колес в оптимальном режиме работы с изолиниями, единицы измерения – Па · 10<sup>4</sup>. Данное сечение проходит через середину величины  $b_2$  и перпендикулярно оси вращения рабочего колеса. Величина давления плавно увеличивается по мере приближения к напорному участку рабочего колеса.

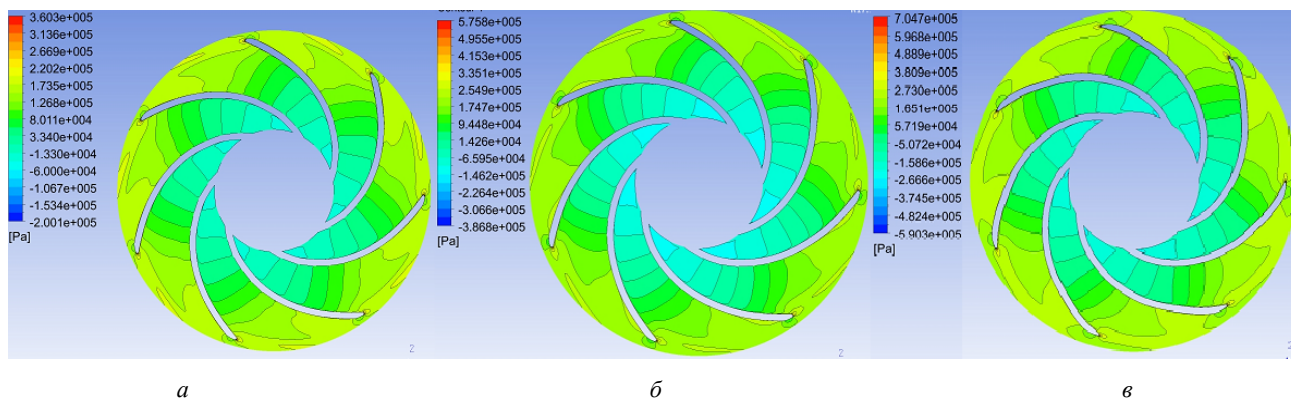


Рис. 5 – Распределение абсолютного давления в рабочих колесах: а –  $n_{SH}=136$ ; б –  $n_{SH}=99$ ; в –  $n_{SH}=83$

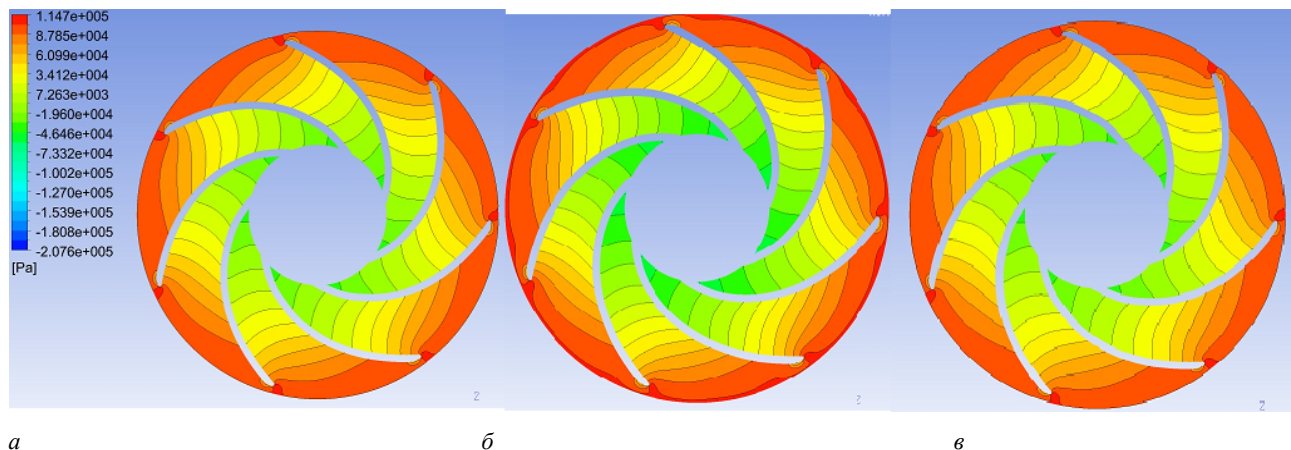


Рис. 6 – Распределение статического давления в рабочих колесах: а –  $n_{SH}=136$ ; б –  $n_{SH}=99$ ; в –  $n_{SH}=83$

Изменение меридиональных скоростей, представленных на рис. 7, характеризуется их плавным изменением вдоль всей проточной части рабочего колеса. Меридиональная скорость представлена в векторном виде в меридиональной проекции. На рис. 8 представлена относительная скорость с изолиниями также с плавным изменением и без отрывов потока. На рис. 7 и 8 показаны результаты для оптимального режима работы. Единицы измерения – м/с.

Также в ходе исследования найдены углы потока на выходе с рабочего колеса  $\beta_2$  и  $\alpha_2$ . Определены скорости  $w_1$  и  $w_2$ , которые характеризуют движение жидкости по каналу. Определена степень диффузорности и реактивности потока. Результаты сведены в табл. 2.

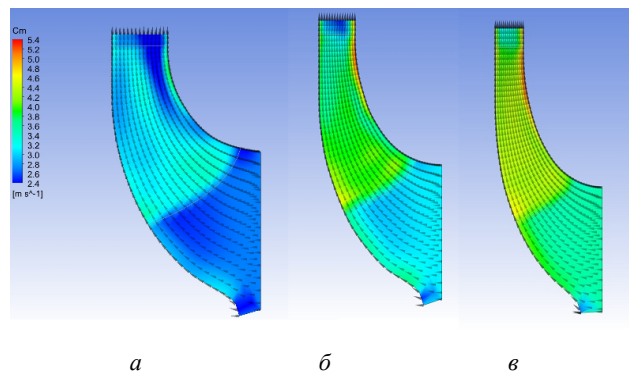


Рис. 7 – Распределение меридиональной скорости в рабочих колесах: а –  $n_{sh}=136$ ; б –  $n_{sh}=99$ ; в –  $n_{sh}=83$

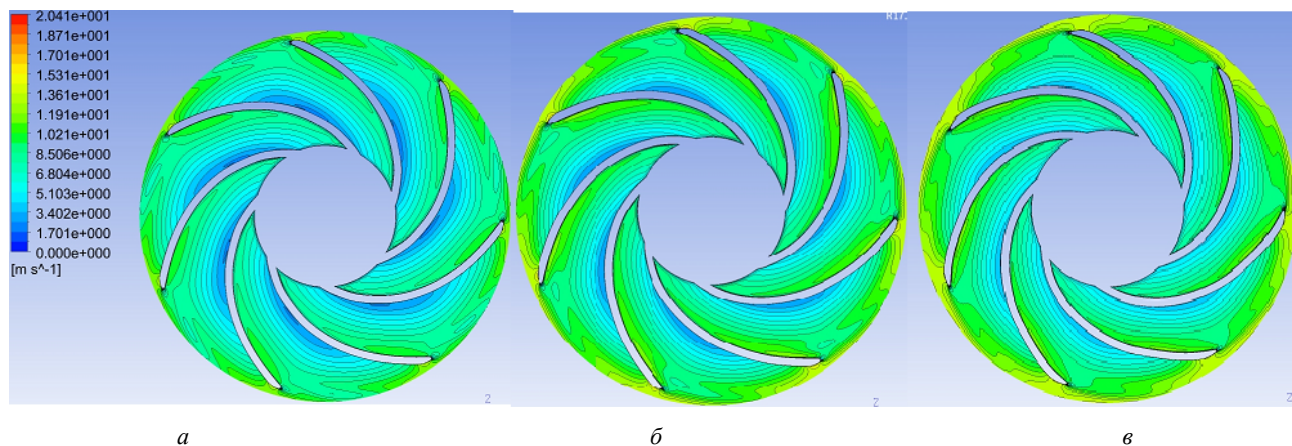


Рис. 8 – Распределение относительной скорости в рабочих колесах: а –  $n_{sh}=136$ ; б –  $n_{sh}=99$ ; в –  $n_{sh}=83$

Таблица 2 – Значения углов  $\beta_2$  и  $\alpha_2$ , а также скоростей  $w_1$  и  $w_2$

Параметры	Быстроходность	$n_{sh}=136$	$n_{sh}=99$	$n_{sh}=83$
	$\beta_2$ , град.		20	19
$\alpha_2$ , град.		15,8	15	13,6
$w_1$ , м/с		12,3	15,6	17,5
$w_2$ , м/с		10,7	12,2	13,4
$w_1 / w_2$		1,15	1,26	1,27
степень реактивности ( $\rho$ )		0,69	0,7	0,71

**Выводы.** Анализ результатов, полученных при проведении численных расчетов пространственного течения вязкой жидкости в рабочих колесах радиально-осевой обратимой гидромашины в программном комплексе *OpenFOAM*, наглядно показывает особенности течения и позволяет определить характер распределения скорости, давления, углов потока, создаваемых лопатками рабочего колеса, обеспечивая их обоснованное проектирование. В результате расчетов получены различные данные, характеризующие движение жидкости по проточной части рабочего колеса.

Список литературы

1. Селезнев В. Н. Расчетное определение энергетических характеристик радиально-осевой насос-турбины на основе трехмерного моделирования течения жидкости / В. Н. Селезнев // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2013. – Т. 15, № 4-2. – С. 583–587.
2. Shudryk A. L. Using open software application packages for simulation of viscous incompressible fluid / A. L. Shudryk // Bulletin of NTU "KhPI". Series : Hydraulic machines and hydrounits. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2016. – No 20 (1192). – P. 90–93.
3. Обратимые гидромашины / Л. П. Гряко, Н. И. Зубарев, В. А. Умов [и др.]. – Л. : Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1981. – 255 с.
4. Дранковский В. Э. Определение расчетных параметров высоконапорных обратимых гидромашин / В. Э. Дранковский, М. Ю. Хавренко // Bulletin of NTU "KhPI". Series : Hydraulic

- machines and hydrounits. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2016. – № 20 (1192). – С. 77–80.
5. Дранковський В. Э. К расчету проточных частей высоконапорных радиально-осевых обратимых гидромашин / В. Э. Дранковський, М. Ю. Хавренко // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Збірник наукових праць. Серія : Математичне моделювання в техніці та технологіях. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – № 16 (1188). – С. 31–36.
  1. Seleznev V. N. "Расчетное определение энергетических характеристик radial'no-osevoj nasos-turbiny na osnove trehmernogo modelirovanija techenija zhidkosti." *Izvestija Samarskogo nauchnogo centra Rossijskoj akademii nauk* 15 (2013): 583–587. Print.
  2. Shudryk A. L. "Using open software application packages for simulation of viscous incompressible fluid." *Bulletin of NTU "KhPI". Series : Hydraulic machines and hydrounits.* No. 20 (1192). Kharkiv: NTU "KhPI", 2016. 90–93. Print.
  3. Grjanko L P et al. *Obratimye gidromashiny*. Leningrad: Mashinostroenie, Leningr. otd-nie, 1981. Print.
  4. Drankovskij V. Je. and Havrenko M. Ju. "Opredelenie raschetnyh parametrov vysokonapornyh obratimyh gidromashin." *Visnik NTU «HPI». Serija: Gidravlichni mashini ta gidroagregati.* No. 20 (1192). Kharkiv: NTU "KhPI", 2016. 77–80. Print.
  5. Drankovskij V. Je. and Havrenko M. Ju. "K raschetu protochnyh chastej vysokonaporny hradial'no-osevyh obratimyh gidromashin." *Visnik Nacional'nogo tehničnogo universtietu «HPI». Zbirnik naukovih prac. Serija: Matematichne modeljuvannja v tehnicі ta tehnologijah.* No. 16 (1188). Kharkiv: NTU "KhPI", 2016. 31–36. Print.

#### References (transliterated)

Поступила (received) 05.02.2014

#### Бібліографічні описи /Библиографические описания /Bibliographic descriptions

**Анализ рабочего процесса в рабочем колесе высоконапорных радиально-осевых обратимых гидромашин / В. Е. Дранковський, М. Ю. Хавренко** // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Гідравлічні машини та гідропневмоагрегати. – Х. : НТУ «ХПІ», 2017. – № 22 (1244). – С. 55–59. – Бібліогр.: 5 назв. – ISSN 2411-3441.

**Анализ рабочего процесса в рабочем колесе высоконапорных радиально-осевых обратимых гидромашин / В. Е. Дранковський, М. Ю. Хавренко** // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Гідравлічні машини та гідропневмоагрегати. – Х. : НТУ «ХПІ», 2017. – № 22 (1244). – С. 55–59. – Бібліогр.: 5 назв. – ISSN 2411-3441.

**Analysis of the working process in the impeller of high-pressure radial-axial reversible hydraulic machines / V. E. Drankovskij, M. Yu. Khavrenko** // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Hydraulic Machines and hydrounits. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2017. – No 22 (1244). – P. 55–59. – Bibliogr.: 5. – ISSN 2411-3441.

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

**Дранковський Віктор Едуардович** – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», професор кафедри «Гідравлічні машини»; тел.: (050) 651-48-84; e-mail: drankovskiy@rambler.ru.

**Дранковський Віктор Едуардович** – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», професор кафедри «Гідравлічні машини»; тел.: (050) 651-48-84; e-mail: drankovskiy@rambler.ru.

**Drankovskij Viktor Eduardovich** – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Docent, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Professor at the Department of "Hydraulic machines" ; tel.: (050) 651-48-84; e-mail : drankovskiy@rambler.ru.

**Хавренко Михайло Юрійович** – Аспірант, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»; тел.: (050) 056-67-94; e-mail: khavrenkom@mail.ru.

**Хавренко Михаил Юрьевич** – Аспірант, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»; тел.: (050) 056-67-94; e-mail: khavrenkom@mail.ru.

**Khavrenko Mihail Yuryevich** – Graduate student, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"; tel.: (050) 056-67-94; e-mail: khavrenkom@mail.ru.