

УДК 621.22

**К. С. РЕЗВА, В. Е. ДРАНКОВСЬКИЙ, І. І. ТИНЬЯНОВА****ДОСЛІДЖЕННЯ ПОТОКУ У ВИСОКОНАПОРНИХ ОБОРОТНИХ ГІДРОМАШИНАХ**

Показано застосування методу осереднених параметрів проточної частини високонапорної гідравлічної машини. Викладено методика розрахунку кутів потоку та основних видів втрат енергії в елементах проточної частини, які необхідні для аналізу робочого процесу в проточній частині. Проведено порівняльний аналіз результатів розрахунку методом осереднених параметрів та результатів чисельного дослідження у програмі CFX. Графічно представлено результати чисельного розрахунку просторової течії в оборотній гідравлічній машині.

**Ключові слова:** оборотна гідравлічна машина, проточна частина, втрати енергії, осереднені параметри, безрозмірні коефіцієнти, чисельне дослідження

Показано применение метода усредненных параметров проточной части высоконапорных гидравлической машины. Изложена методика расчета углов потока и основных видов потерь энергии в элементах проточной части, которые необходимы для анализа рабочего процесса в проточной части. Проведен сравнительный анализ результатов расчета методом осредненных параметров и результатов численного исследования в программе CFX. Графически представлены результаты численного расчета пространственного течения в оборотной гидравлической машине.

**Ключевые слова:** оборотная гидравлическая машина, проточная часть, потери энергии, осредненные параметры, безразмерные коэффициенты, численное исследование

The application of the averaged parameters method of the water passage of the high-pressure hydraulic machine is shown. The methodology of the calculation of the angles of the fluid flow and the main types of energy losses in parts of the water passage that are necessary for analyzing the working process in the hydraulic machine is considered. The comparative analysis of calculation results by the averaged parameters method and the results of the numerical research in the CFX program is carry out. The results of the numerical calculation of the spatial flow in the reversible hydraulic machine are presented graphically.

**Keywords:** reversible hydraulic machine, water passage, energy losses, averaged parameters, dimensionless coefficients, numerical study

**Вступ.** Відповідно до прогнозованого росту населення, щорічно споживання електроенергії зростатиме майже на 1 %. Такі данні опублікувало Міжнародне енергетичне агентство ІЕА (International Energy Agency). Для вирішення виникаючих проблем стає доцільно використовувати відновлювані ресурси, яким і є гідроенергія. За останні роки лідерами виробництва гідроенергії виступають Китай, Бразилія, Сполучені штати Америки, Канада. В багатьох країнах, що мають значний гідроенергетичних потенціал, досягнуто максимальне його значення.

Якщо розглядати питання гідропотенціалу країн, що розвиваються, а до їх числа входить і Україна, то вони мають великі ресурси для інтенсивного розвитку галузі.

Сьогодні доля гідроенергетики України в загальному балансі виробництва електроенергії складає лише 6 %. Це призвело до визначення напрямку стратегії розвитку енергетики нашої країни до 2030 року для збільшення долі гідроенергетики до 15-17 %. Ця стратегія відповідатиме міжнародним тенденціям, де в якості джерел енергії будуть використовуватися відновлювальні ресурси: вода, вітер, сонце. А отже розглядається розширене використання ГЕС та ГАЕС. Ці станції являють собою важливу частину енергетичної системи, робота яких повинна забезпечувати оптимальні режими вироблення, розподілу, передачі та споживання енергії. Саме використання ГАЕС зумовлює регулювання напівпікових та пікових частин графіків навантажень, дозволяє істотно підвищити стійкість енергетичної системи. Реалізація вказаних функцій веде до розглядання можливості побудови нових, добудови та модернізації існуючих гідроакмулюючих електростанцій [1, 2].

**Основна частина.**

При проектування чи модернізації гідравлічних машин використовують різноманітні методи та підходи для розв'язання поставлених задач.

Одним із методів розрахунку просторової течії є метод осереднення, коли визначаються параметри у характерних перетинах проточної частини гідравлічної машини. В якості характерних перетинів приймають наступні (рис. 1): на виході з направляючого апарату, на вході в робоче колесо, на виході з робочого колеса, на вході у відсмоктуючу трубу.

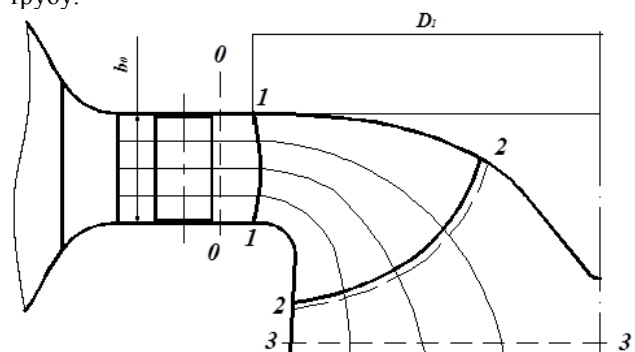


Рис. 1 – Характерні перетини проточної частини гідравлічної машини: 0-0 – вихід з направляючого апарату, 1-1 – вход в робоче колесо, 2-2 – вихід з робочого колеса, 3-3 – вход у відсмоктуючу трубу

Для опису робочого процесу, розрахунку та аналізу енергетичних характеристик в оборотній гідравлічній машині використовують основне рівняння гідромашин, рівняння балансу енергії, рівняння кінематичного зв'язку, які можна представити у загальному вигляді або за допомогою безрозмірних комплексів, структура яких витікає з

теорії розмірності [3, 4].

$$k_{M\Gamma}^* = f_M^* \left( \frac{Q}{\omega D^3}, \frac{\bar{\Gamma}_0}{\omega D^2}, L'_{PK} \right),$$

$$k_{N\Gamma}^* = f_N^* \left( \frac{Q}{\omega D^3}, \frac{\bar{\Gamma}_0}{\omega D^2}, L'_{PK} \right),$$

$$k_{HT}^* = f_H^* \left( \frac{Q}{\omega D^3}, \frac{\bar{\Gamma}_0}{\omega D^2}, L'_{PK} \right),$$

$$\eta = f_\eta \left( \frac{Q}{\omega D^3}, \frac{\bar{\Gamma}_0}{\omega D^2}, L' \right),$$

$$k_{h\Gamma}^* = f_h^* \left( \frac{Q}{\omega D^3}, \frac{\bar{\Gamma}_0}{\omega D^2}, L' \right),$$

де  $L'$  – символічне позначення набору безрозмірних геометричних параметрів проточної частини,  $\bar{\Gamma}_0$  – безрозмірний коефіцієнт циркуляції.

У такому разі кожна з характеристик визначається відповідним коефіцієнтом, де в якості величин із незалежною розмірністю використовувались  $\omega$ ,  $\rho$ ,  $D$ :

$k_Q^*$  – узагальнений режимний коефіцієнт,  $k_M^*$  – коефіцієнт моменту,  $k_N^*$  – коефіцієнт потужності,  $k_H^*$  – коефіцієнт напору,  $k_h^*$  – коефіцієнт втрат енергії.

Кожний коефіцієнт визначається наступними формулами:

$$k_{M\Gamma}^* = \frac{M_\Gamma}{\rho \omega^2 D^5},$$

$$k_{N\Gamma}^* = \frac{N_\Gamma}{\rho \omega^3 D^5},$$

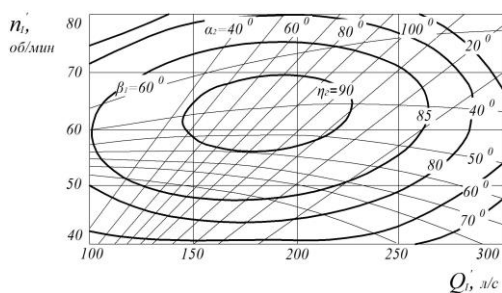
$$k_{HT}^* = \frac{g H_T}{\omega^2 D^2},$$

$$k_{h\Gamma}^* = \frac{g h_\Gamma}{\omega^2 D^2},$$

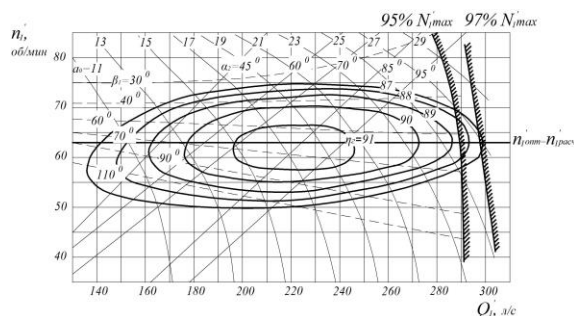
$$k_Q^* = \frac{g Q}{\omega^2 D^3}.$$

Представимо рівняння балансу енергії для оборотної гідравлічної машини в турбінному режимі, використовуючи безрозмірні коефіцієнти:

$$\frac{g}{Q_I'^2} = k_{HT}^* + k_{h\Gamma}^*.$$



а



б

Рис. 2 – Характеристика радіально-осьової турбіни PO500:  
а – розрахункова, б – експериментальна

Данна формула описує гідравлічні втрати.

Відома схема розподілу втрат в решітках за їхньою фізичною природою на втрати тертя, кромкові, ударні, циркуляційні, кінцеві. Загальні втрати в кожному елементі проточної частини оборотної гідромашини визначаються як сума цих видів втрат [5].

$$k_h^* = k_{h\Pi}^* + k_{hPK}^* + k_{hem}^*,$$

де  $k_{h\Pi}^*$ ,  $k_{hPK}^*$ ,  $k_{hem}^*$  – втрати в підводі, робочому колесі та відсмоктуючій трубі відповідно.

Коефіцієнт втрат у підводі дорівнює:

$$k_{h\Pi}^* = k_{hCK}^* + k_{hcm}^* + k_{hHA}^*,$$

де  $k_{hCK}^*$ ,  $k_{hcm}^*$ ,  $k_{hHA}^*$  – коефіцієнти втрат у спіральній камері, статорі та направляючому апараті [6, 7].

Аналіз балансу втрат необхідний для визначення умов формування оптимального режиму, а також визначення саме тих видів втрат, які найбільш впливають на характер зміни ККД в області основних робочих режимів.

В результаті розрахунків методом осереднених параметрів визначають кути потоку  $\beta_1$  (кути атаки на вході в робоче колесо) та  $\alpha_2$  (кути потоку за робочим колесом) в характерних перетинах проточної частини, що дає інформацію про обтікання лопатевої системи робочого колеса та про узгодження елементів проточної частини гідравлічної машини.

В даній роботі були проведені розрахунки високонапорної гідротурбіни PO500, оборотної гідравлічної машини OPO200.

На рисунку 2, а представлена прогнозна характеристика гідротурбіни PO500. Ізолінії гідравлічного ККД ( $\eta_\Gamma$ ), кутів потоку ( $\beta_1$  та  $\alpha_2$ ) були отримані по результатам розрахунку методом осереднених параметрів.

На рисунку 2, б – характеристика, що побудована по результатам експериментальних даних, в ході зондових досліджень. На ній нанесено ті самі характеристики потоку, а також визначено оптимальну та розрахункову точки. Для радіально-осьових гідротурбін оптимальна та розрахункова точки майже не відрізняються за приведеними оборотами, тому приймають рівні значення цих величин.

Провівши порівняльний аналіз характеристик, можна стверджувати, результати обох методів подібні. Це свідчить про те, що точність вимірів на модельних установках висока, а метод осереднених параметрів може бути використаний на початкових етапах моделювання проточної частини та на наступних етапах. Даний метод значно скорочує об'єм розрахунків та експериментальних робіт.

В роботі було проведено розрахунки енергетичних параметрів оборотної гідромашини методом осереднених параметрів для подальшого порівняння з експериментальними даними та результатами чисельного дослідження, щоб визначити можливість використання методу дослідження оборотної гідравлічної машини в турбінному режимі роботи.

На рисунку 3 представлена прогнозна характеристика разом з експериментальною характеристикою оборотної гідромашини ОРО200.

Суцільні лінії – результати розрахунків, прогнозні значення ККД. Штрихові лінії отримані за результатами експериментальних робіт. Також на прогнозній характеристиці зображені ізолінії кутів  $\alpha_2$ . Результати не співпадають із-за того, що при використанні осереднених параметрів під час розрахунків отримують гідравлічний ККД, а після експерименту відомі значення повного ККД. Тому необхідно враховувати ще й об'ємний та дисковий ККД.

Графіки різних втрат енергії представлено на рисунку 4, а-б.

На графіку залежності втрат від приведеної витрати (рис. 4, б) нанесено результати розрахунків в пакеті програм CFX. Розраховувались втрати енергії у

підводі проточної частини оборотної гідромашини для різних відкриттів направляючого апарату. Характер кривої, отриманої в результаті просторового дослідження течії, схожий з характером кривої, яка побудована по результатам розрахунку з використанням осереднених параметрів.

В точці оптимального режиму ( $Q_{opt} = 330$  л/с,  $n_{opt} = 78$  об/хв) дані чисельного експерименту дуже близькі з прогнозними (розрахунковими): 1,54% та 1,56% відповідно.

Результати чисельного дослідження потоку представлені графічно за допомогою розподілу тиску (рис. 5) та швидкостей (рис. 6) в горизонтальних перетинах підводу проточної частини.

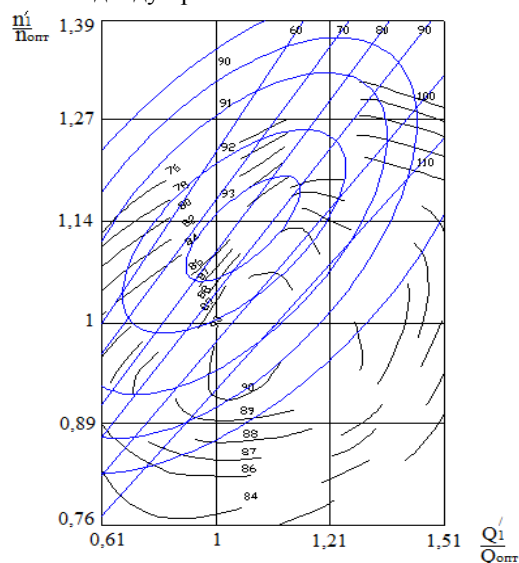


Рис. 3 – Порівняння розрахункової та експериментальної характеристик оборотної гідромашини ОРО200

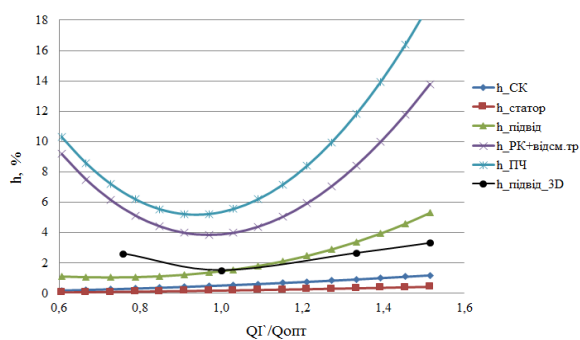
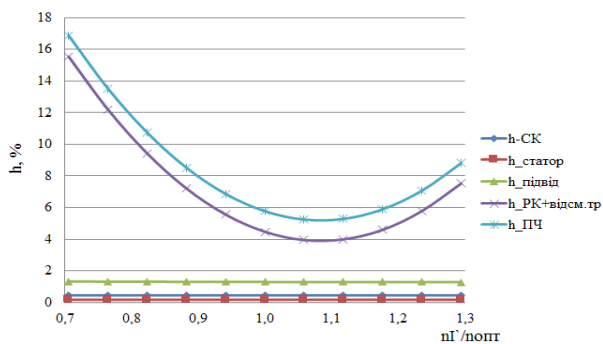
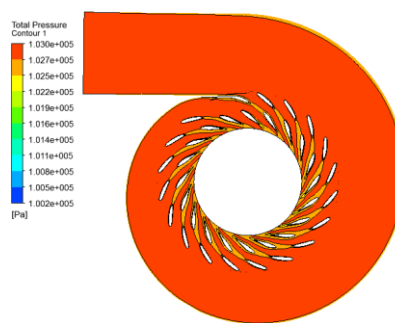
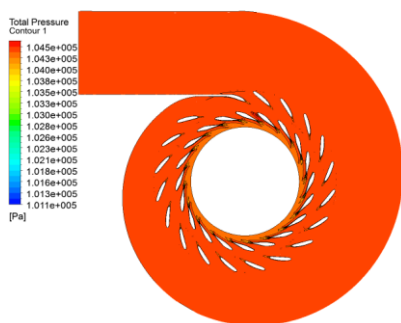


Рис. 4 – Залежність втрат в елементах проточної частини радіально-осьової оборотної турбіни ОРО200: а – від приведених оборотів ( $n_{opt} = 78$  об/хв), б – від приведеної витрати ( $Q_{opt} = 330$  л/с)



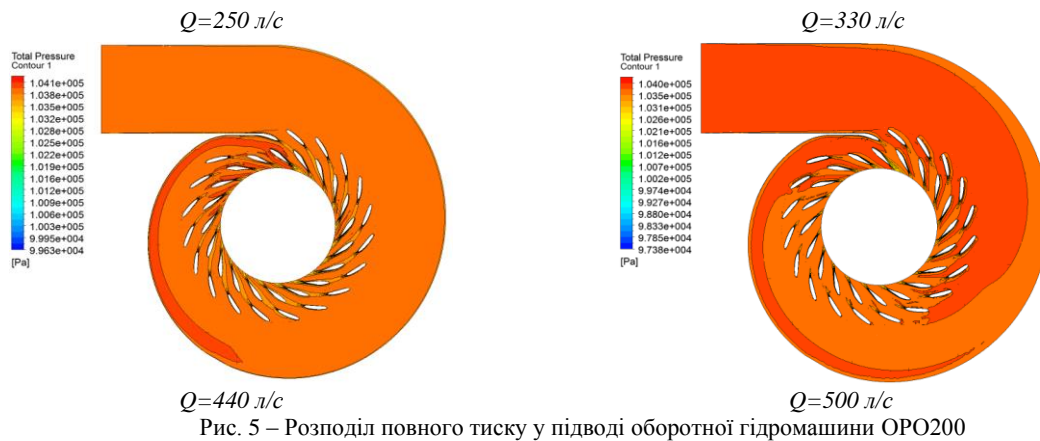


Рис. 5 – Розподіл повного тиску у підводі оборотної гідромашини ОРО200

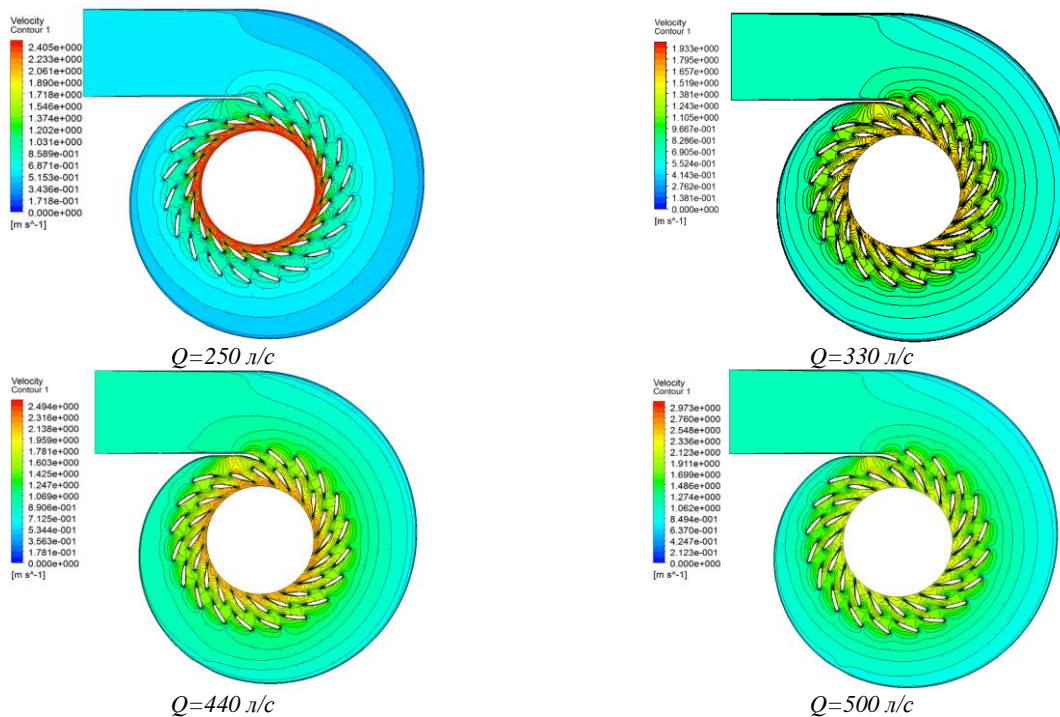


Рис. 6 – Розподіл швидкостей у підводі оборотної гідромашини ОРО200

**Висновки.** Для визначення гідродинамічних характеристик оборотної гідромашини в турбінному режимі необхідно знати коефіцієнти напору, втрат в елементах проточної частини, об'ємний та дисковий ККД. Вибір найбільш ефективного методу залежить від стадії проектування проточної частини та від поставленої задачі. А уточнити проведені розрахунки методом осереднених параметрів можливо завдяки програмам для чисельного дослідження просторової течії.

#### Список литературы

1. Ландау Ю. А. Основные тенденции развития гидроэнергетики Украины / Ю. А. Ландау // Научные работы. – Харьков, 2014. – Том 53. Выпуск 40. – С. 82-86.
2. Рябенко О. А. Роль ГАЕС в роботі енергосистем / О. А. Рябенко, О. О. Клоха, В. С. Тимощук // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – Київ, 2014. – № 2. – С. 167-170.
3. Руднев С. С. Основы теории лопастных решеток : учеб. пособие / С. С. Руднев. – М., 1976. – 61 с.
4. Виктор Г. В. Классификация гидромашин и баланс энергии : учеб. пособие / Г. В. Виктор. – М., 1979. – 94 с.

5. Этинберг И. Э. Гидродинамика гидравлических турбин / И. Э. Этинберг, Б. С. Раухман. – Л.: Машиностроение, 1978. – 280 с.

6. Кольчев В. А. Расчет гидродинамических характеристик направляющих аппаратов гидротурбины / Кольчев В. А., Дранковский В. Э. [и др.] – Харьков: НТУ «ХПИ», 2002. – 216 с.

7. Кольчев В. А. Расчет и анализ баланса потерь энергии в высоконапорной радиально-осевой гидравлической турбине / В. А. Кольчев, К. А. Миронов, И. И. Тынянова // Східно-Європейський журнал передових технологій. – Харків, 2005. – № 1/2 (13). – С. 95–106.

#### References (transliterated)

1. Landau YU. A. Osnovnye tendencii razvitiya gidroenergetiki Ukrainy / YU. A. Landau // *Nauchnye raboty*. – Har'kov, 2014. – Tom 53. Vipusk 40. – 82-86. Print
2. Ryabenko O. A. Rol' GAES v roboti energosistem / O. A. Ryabenko, O. O. Klyuha, V. S. Timoshchuk // *Vimiryval'na ta obchislyval'na tekhnika v tekhnologichnih procesah*. – Kii'v, 2014. – № 2. – 167 – 170. Print
3. Rudnev S. S. Osnovy teorii lopastnyh reshetok : *ucheb. posobie* / S. S. Rudnev. – M., 1976. Print
4. Viktorov G. V. Klassifikaciya gidromashin i balans ehnergii : *ucheb. posobie* / G. V. Viktorov. – M., 1979. – 94 c. Print
5. EHtinberg I. EH. Gidrodinamika gidravlicheskih turbin / I. EH. EHtinberg, B. S. Rauhman. – L.: *Mashinostroenie*, 1978. Print
6. Kolychev V. A. Raschet gidrodinamicheskikh karakteristik

napravlyayushchih apparatov gidroturbiny / Kolychev V. A., Drankovskiy V. E.H. [i dr.] – Har'kov: NTU «HPI», 2002. Print  
zhurnal peredovih tekhnologij. – Harkiv, 2005. – № 1/2 (13). – 95 – 106. Print

7. Kolychev V. A. Raschet i analiz balansa poter' ehnergii v vysokonapornoj radial'no-osevoj gidravlicheskoj turbine / V. A. Kolychev, K. A. Mironov, I. I. Tyn'yanova // *Skhidno-Evropejs'kij*

Надійшла (received) 01.11.2017

*Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions*

Дослідження потоку у високонапорних оборотних гідромашинах / К. С. Резва, В. Е. Дранковський, І. І. Тиньянова // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Гідравлічні машини ш гідроагрегати. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – № 42(1264) – С. 84-88. – Бібліогр.: 7 назв. – ISSN 2411-3441 (print)

Исследование потока в высоконапорных обратимых гидромашинах / К. С. Резвая, В. Э. Дранковский, И. И. Тиньянова // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Гідравлічні машини ш гідроагрегати. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – № 42(1264) – С. 84-88. – Бібліогр.: 7 назв. – ISSN 2411-3441 (print)

The research in the high-pressure reversible hydraulic machine / K. Rezva, V. Drankovskiy, I. Tynyanova // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Hydraulic machines and hydrounits. – Kharkov : NTU "KhPI", 2017. – No. 42(1264). – P. 84–88. – Bibliogr.: 7. – ISSN 2411-3441 (print)

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

**Rezva Kseniya Sergeevna** - graduate student, Assistant of the department "Hydraulic machines" of National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, tel.: (057) 707-66-46, e-mail: rezvayaks@gmail.com.

**Резва Ксенія Сергіївна** – аспірант, асистент кафедри «Гідравлічні машини» Національного технічного університету «Харківського політехнічного інституту», Харків, тел.: (057) 707-66-46, e-mail: rezvayaks@gmail.com.

**Drankovskiy Viktor Eduardovich** - Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Docent, Professor of the department "Hydraulic machines" of National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, tel.: (057) 707-66-46, e-mail: drankovskiy@rambler.ru.

**Дранковський Віктор Едуардович** – кандидат технічних наук, доцент, професор кафедри «Гідравлічні машини» Національного технічного університету «Харківського політехнічного інституту», Харків; тел.: (057) 707-66-46, e-mail: drankovskiy@rambler.ru.

**Tynyanova Irina Ivanovna** – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Docent of the department "Hydraulic machines" of National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkov; tel.: (057) 707-66-46, e-mail: t.irinai@mail.ru.

**Тиньянова Ірина Іванівна** – кандидат технічних наук, доцент кафедри «Гідравлічні машини» Національного технічного університету «Харківського політехнічного інституту», Харків; тел.: (057) 707-66-46, e-mail: t.irinai@mail.ru.