

СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»  
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Кваліфікаційна наукова  
праця на правах рукопису

Москаленко Владислав Вікторович

УДК 621.65

## ДИСЕРТАЦІЯ

ПОКРАЩЕННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ХАРАКТЕРИСТИК НАСОСІВ ТИПУ Д  
ШЛЯХОМ ЗНИЖЕННЯ ІНТЕНСИВНОСТІ ПУЛЬСАЦІЙ ТИСКУ У ЇХ  
ПРОТОЧНІЙ ЧАСТИНІ

05.05.17 – гідравлічні машини та гідропневмоагрегати

13 – Механічна інженерія

Подається на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,  
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

*Уданий зміст за змістом  
з першим приліпником  
дисертації засвідчую,  
що це дійсно авторський  
текст. Дбч. 050.11  
Філіп Діні Ю.О.*

В.В. Москаленко

Науковий керівник

**Сотник Микола Іванович,**

доктор технічних наук, доцент

Харків – 2020



## АНОТАЦІЇ

**Москаленко В.В. Покращення експлуатаційних характеристик насосів типу Д шляхом зниження інтенсивності пульсацій тиску у їх проточній частині.** На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.05.17 – гідравлічні машини та гідропневмоагрегати. – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, 2021 р.

Дисертаційна робота присвячена дослідженню інтенсивності пульсацій тиску у проточній частині насоса типу Д та визначенню величини впливу основних конструкційних і робочих параметрів відцентрового насоса спірального типу на амплітуду пульсацій тиску на виході з його робочого колеса. Метою даного дослідження є формування переліку ефективних способів зниження гідродинамічної вібрації та покращення експлуатаційних характеристик насосів типу Д.

За результатами інформаційно-аналітичного огляду літературних джерел визначено основні джерела гідродинамічної вібрації та залежність її величини від подачі насоса. Встановлено, що гідродинамічна вібрація насоса є наслідком пульсацій тиску у його проточній частині, а оцінювання інтенсивності пульсацій тиску є одним з реальних способів отримання непрямим методом інформації щодо інтенсивності гідродинамічної вібрації насоса на етапі його розробки.

Експериментальне дослідження параметрів робочого процесу насоса Д2000-100-2, як типового представника насосів типу Д і класу відцентрових насосів спірального типу, підтвердило, що інтенсивність гідродинамічної вібрації основних вузлів насоса залежить від інтенсивності пульсацій тиску у його проточній частині та дало можливість визначити коефіцієнт кореляції, що характеризує взаємозв'язок між середньоквадратичним значенням (СКЗ) віброшвидкості корпусу підшипника насоса на лопатевій частоті та СКЗ амплітуди лопатевих пульсацій тиску на виході з його спірального відводу, а

також дозволило визначити граничне СКЗ амплітуди пульсацій тиску за якого спостерігається перевищення граничного СКЗ віброшвидкості корпусу підшипника насоса Д2000-100-2. На основі результатів експериментального дослідження параметрів робочого процесу ( $H$ ,  $N$ ,  $\eta$  та  $\Delta P$ ) насоса Д2000-100-2 підтверджено адекватність розрахункової сітки проточної частини насоса та числового моделювання нестационарної течії рідини.

Числове дослідження параметрів робочого процесу насоса типу Д підтвердило залежність амплітуди пульсацій тиску від подачі насоса, дало можливість встановити фізичну природу та вплив рециркуляції потоку на виході з робочого колеса на амплітуду лопатевих пульсацій тиску рідини, визначити вплив основних конструкційних параметрів проточної частини відцентрового насоса спірального типу та його робочих параметрів на амплітуди пульсацій тиску та інтегральні параметри робочого процесу насоса. За результатами числового дослідження сформовано перелік способів зниження інтенсивності пульсацій тиску в залежності від їх ефективності (з точки зору розширення робочого діапазону насоса) та визначено величини впливу відносної зміни конструкційних параметрів проточної частини відцентрового насоса спірального типу ( $z_1$ ,  $b_1$ ,  $b_2$ ,  $D_3/D_2$ ,  $\varphi$ ,  $\psi$ ,  $z_2$ ) та його робочих параметрів ( $Q$ ,  $n$ ) на відносну зміну СКЗ амплітуди пульсацій тиску рідини на виході з робочого колеса.

На основі наукового узагальнення результатів числового моделювання та факторного експерименту сформовано рекомендації щодо корегування основних геометричних параметрів робочого колеса зі взаємним зсувом його лопатей на  $1/2$  кроку один відносно одного з метою покращення експлуатаційних характеристик насосів типу Д при якісному та енергоефективному водопостачанні в діапазоні подач  $0,3Q_{opt} \dots Q_{opt}$ .

Оцінку доцільності проведення модернізації існуючого насоса шляхом заміни його робочого колеса запропоновано проводити з урахуванням реальних робочих режимів насосного агрегату за подачею та на основі показника питомих витрат електроенергії на перекачування одиниці об'єму рідини. На основі запропонованої методики, в залежності від подачі насосів типу Д ( $Q$ ) та

капітальних витрат на його модернізацію ( $C_{mod}$ ), встановлено нижню межу значень різниці показника питомих витрат електроенергії ( $\Delta\rho_{1,2}$ ,  $\text{кВт}\cdot\text{год}/\text{м}^3$ ) за якої термін окупності заходу з модернізації робочого колеса не перевищуватиме середнього терміну його експлуатації (для робочих коліс насосів типу Д -  $t=5-8$  років).

**Ключові слова:** відцентровий насос, гідродинамічна вібрація, числове моделювання, фізичний експеримент.

**Moskalenko V.V. Improving the operational characteristics of type D pumps by reducing the intensity of pressure pulsations in their flowing part. - Manuscripts.**

The dissertation on competition of a scientific degree of the candidate of technical sciences on a specialty 05.05.17 - «Hydraulic machines and hydropneumatic units». - National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, 2021.

The dissertation is devoted for researching the intensity of pressure pulsations in the flowing part of the pump type D and determination the influence of the main constructional and operating parameters of spiral type centrifugal pump on the amplitude of pressure pulsations in the outlet of impeller with aim to form the list of effective ways of reducing hydrodynamic vibration at the source of beginning and improving the operational characteristics of type D pumps.

Based on the results of the information-analytical review of the literature sources, was determine the main sources of hydrodynamic vibration and the dependence of its value on the pump supply. It is established that the hydrodynamic vibration of the pump is a consequence of pressure pulsations in its flowing part, and estimating the intensity of pressure pulsations is one of the real ways to obtain by an indirect method the information about the intensity of hydrodynamic vibration of the pump at the development stage.

Experimental research of the operating parameters of the pump D2000-100-2, as a typical representative of pumps type D and the class of spiral type centrifugal pumps , confirmed that the intensity of hydrodynamic vibration of the main units of pump

depends on the intensity of pressure pulsations in its flowing part and allowed to determine the correlation coefficient that characterizing the relationship between the root mean square value (RMS) of the vibration velocity of the pump bearing shell at the blade frequency and the RMS value of the pressure pulsations amplitude at the blade frequency at the outlet of volute, and also allowed to determine the limiting RMS value of pressure pulsations amplitude at which the RMS value of the vibration velocity of the pump D2000-100-2 bearing shell is overrun. Based on the results of the experimental study of the operating process parameters ( $H$ ,  $N$ ,  $\eta$  and  $\Delta P$ ) of the pump D2000-100-2, were confirmed the adequacy of the calculated grid of the flowing part of the pump and numerical simulation of non-stationary fluid flowing.

Numerical research of the parameters of the operational process of the pump type D confirmed the dependence of the amplitude of pressure pulsations on the pump supply, made it possible to establish the physical nature and the influence of recirculation of flow at the outlet of impeller on the pressure pulsation amplitude at the blade frequency and to determine the influence of the main constructional parameters of the flowing part of spiral type centrifugal pump and its operating parameters on the pressure pulsations amplitude and the integral parameters of the pump operational process. According to the results of the numerical study, a list of ways to reduce the intensity of pressure ripples depending on their efficiency (in terms of expanding the operating range of the pump) and determined the magnitude of the impact of relative changes in the constructional parameters of the spiral type centrifugal pump ( $z_1$ ,  $b_1$ ,  $b_2$ ,  $D_3/D_2$ ,  $\varphi$ ,  $\psi$ ,  $z_2$ ) and its operating parameters ( $Q$ ,  $n$ ) on the relative change of the RMS value of pressure pulsations amplitude at the outlet of impeller.

Based on the scientific generalization of numerical modeling results and factorial experiment, were formed recommendations for adjusting the basic geometric parameters of the impeller with mutual displacement of its blades by 1/2 step relative to each other to improve the operational characteristics of type D pumps with quality and energy efficient water supply in the supply range  $0,3Q_{opt} \dots Q_{opt}$ .

It is proposed to assess the feasibility of modernizing an existing pump by replacing its impeller, taking into account the actual operating modes of the pump unit

on the supply and on the basis of the specific electricity consumption for pumping a unit volume of liquid. Based on the proposed method, depending on the supply of pumps type D ( $Q$ ) and capital costs for its modernization ( $C_{mod}$ ), the lower limit of the difference between the specific consumption of electricity ( $\Delta\rho_{1,2}$ ,  $kW\cdot h/m^3$ ) for which the payback period the measure of modernization of the impeller will not exceed the average service life (for impellers of pumps type D -  $t = 5-8$  years).

**Keywords:** centrifugal pump, hydrodynamic vibration, numerical research, physical experiment.

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

### *Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:*

1. Москаленко В.В., Бойко В.С., Сотник М.І. Моделювання особливих режимів роботи електромеханічних систем мереж водопостачання. Науково-практичний журнал «Електротехніка і електромеханіка». 2016. № 4 (1). С. 4-9.

2. Moskalenko V., Sotnyk M., Boiko V. Head pulsations in a centrifugal pump. IOP Materials Science and Engineering. 2017. Vol. 233. P. 1-8. doi: 10.1088/1757-899X/233/1/012058.

3. Москаленко В.В., Луговая С.О. Влияние геометрии выходного участка лопасти на нестационарное взаимодействие вращающегося рабочего колеса и спирального отвода центробежного насоса. Научно-практический журнал «Насосы и оборудование». 2016. № 4(99) – 5(100). С. 64-67.

4. Moskalenko V., Sotnyk M., Boiko V., Chernobrova A. Recirculation power in the balance of hydraulic losses of centrifugal pump. Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu. 2020. № 5. P. 82-88. doi: 10.33271/nvngu/20205/082.

5. Москаленко В.В., Сотник М.І., Сохань А.О., Сухоставець Д.І. Прогнозування вібраційного стану електронасосного агрегату. Науково-виробничий журнал «Електромеханічні і енергозберігаючі системи». 2020. №3 (51). С. 19-26.

6. Moskalenko V. Improvement of Energy Efficiency of Electromechanical Systems Functioning for Buildings of Higher Education Institutions. Power supply for educational institutions: efficiency and alternatives: Collective monograph. 2020. P. 132-139.

*Наукові праці апробаційного характеру*

7. Москаленко В.В. Сотник М.І. Результати моделювання течії рідини у проточній частині відцентрового насосу. Сучасні технології у промисловому виробництві: матеріали та програма IV Всеукраїнської міжвузівської науково-технічної конференції, м. Суми, 19–22 квітня 2016 р.: у 2-х ч. Редкол.: О.Г. Гусак, В.Г. Євтухов. Суми: СумДУ. 2016. Ч.2. С. 156.

8. Москаленко В.В., Сотник М.І., Сохань А.О., Сухоставець Д.І. Пульсації тиску у відцентрових насосах. Science, society, education: topical issues and development prospects. Abstracts of the 2nd International scientific and practical conference. SPC “Sci-conf.com.ua”. Kharkiv, Ukraine. 2020. Pp. 271-275.

9. Москаленко В.В., Сотник М.І. Дослідження гідродинамічних процесів у відцентрових насосах з метою зниження їх віброактивності. Сучасні технології у промисловому виробництві: матеріали науково-технічної конференції викладачів, співробітників, аспірантів і студентів факультету технічних систем та енергоефективних технологій, м. Суми, 18–21 квітня 2017 р.: у 2-х ч. Ред.кол.: О.Г. Гусак, В.Г. Євтухов. Суми: СумДУ. 2017. Ч.2. С. 48.

## ЗМІСТ

|   |    |
|---|----|
| ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, ІНДЕКСІВ, СКОРОЧЕНЬ .....  | 5  |
| ВСТУП.....  | 7  |
| 1 СТАН ПРОБЛЕМИ, ОБГРУНТУВАННЯ АКТУАЛЬНОСТІ ТЕМИ ДОСЛІДЖЕННЯ .....  | 14 |
| 1.1 Проблема виникнення вібрації у відцентрових насосах.....  | 14 |
| 1.2 Види та причини гідродинамічної вібрації відцентрових насосів .....   | 19 |
| 1.3 Аналіз досліджень щодо інтенсивності пульсацій тиску у проточній частині відцентрових насосів.....                          | 27 |
| 1.4 Числове дослідження інтенсивності пульсацій тиску.....  | 35 |
| 1.5 Висновки .....  | 38 |
| 2 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ТА ЧИСЛОВЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРАМЕТРІВ РОБОЧОГО ПРОЦЕСУ НАСОСА ТИПУ Д.....  | 41 |
| 2.1 Експериментальне дослідження роботи насосної станції з насосами типу...41   | 41 |
| 2.1.1 Опис насосної станції оборотного водопостачання .....   | 42 |
| 2.1.2 Базове обладнання та засоби вимірювання, що використовувалися при проведенні експериментальних досліджень .....           | 45 |
| 2.1.3 Методика проведення експериментального дослідження основних параметрів робочого процесу насоса Д2000-100-2.....           | 47 |
| 2.1.4 Методика проведення експериментального дослідження взаємозв'язку гідродинамічної вібрації насоса з пульсаціями тиску..... | 48 |
| 2.1.5 Оцінка похибок результатів вимірювань.....  | 49 |
| 2.1.6 Результати експериментального дослідження та їх аналіз.....   | 51 |
| 2.2 Числовий експеримент як метод дослідження інтенсивності пульсацій тиску у проточній частині насоса.....                     | 55 |
| 2.2.1 Геометричні параметри досліджуваного насоса.....  | 57 |
| 2.2.2 Створення тривимірної моделі проточної частини насоса .....   | 58 |
| 2.2.3 Створення сіткової моделі розрахункової області.....  | 59 |
| 2.2.4 Математичний алгоритм моделювання течії рідини.....   | 62 |

|       |   |
|-------|---|
|       | 3   |
| 2.2.5 | Визначення граничних умов та параметрів розрахунку ..... 65   |
| 2.2.6 | Виконання розрахунку ..... 66   |
| 2.2.7 | Візуалізація та аналіз результатів розрахунку ..... 67  |
| 2.3   | Адекватність числового дослідження ..... 70   |
| 2.4   | Висновки ..... 72   |
| 3     | РЕЗУЛЬТАТИ ЧИСЛОВОГО ДОСЛІДЖЕННЯ ІНТЕНСИВНОСТІ ПУЛЬСАЦІЙ ТИСКУ ..... 75   |
| 3.1   | Пульсації тиску та залежність їх амплітуди від подачі..... 75   |
| 3.2   | Вплив рециркуляції потоку на інтенсивність пульсацій тиску ..... 79   |
| 3.3   | Дослідження впливу конструкційних та робочих параметрів насоса на амплітуду пульсацій тиску ..... 84                                      |
| 3.3.1 | Дослідження впливу кількості лопатей робочого колеса ..... 85   |
| 3.3.2 | Дослідження впливу ширини виходу з робочого колеса..... 90  |
| 3.3.3 | Дослідження впливу відношення діаметру спіралі відводу до зовнішнього діаметру робочого колеса ..... 94                                   |
| 3.3.4 | Дослідження впливу кута нахилу вихідної кромки..... 98  |
| 3.3.5 | Дослідження впливу зміни частоти обертання робочого колеса..... 102   |
| 3.3.6 | Дослідження впливу взаємного розташування лопатей двох половин робочого колеса..... 106   |
| 3.3.7 | Дослідження впливу двозавиткового спірального відводу ..... 110   |
| 3.3.8 | Дослідження впливу ширини вхідної воронки робочого колеса ..... 114   |
| 3.4   | Заходи щодо зменшення амплітуди пульсацій тиску у джерелі їх виникнення..... 118  |
| 3.5   | Ефективність способів зниження амплітуди пульсацій тиску ..... 124  |
| 3.6   | Висновки ..... 128  |
| 4     | КОРЕГУВАННЯ ОСНОВНИХ ГЕОМЕТРИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ РОБОЧОГО КОЛЕСА НАСОСІВ ТИПУ Д 3 МЕТОЮ ПОКРАЩЕННЯ ЇХ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ..... 131 |
| 4.1   | Вибір параметрів корегування, основних факторів та рівнів їх варіювання, складання матриць планування ..... 131                           |

|   |     |
|---|-----|
| 4.2 Отримання та аналіз рівнянь регресії, оцінка адекватності моделі..... | 133 |
| 4.3 Методика оцінки доцільності проведення модернізації.....              | 138 |
| 4.4 Висновки .....  | 145 |
| ВИСНОВКИ.....   | 148 |
| СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....   | 153 |
| ДОДАТОК А.....  | 161 |
| ДОДАТОК Б .....   | 161 |