

**О.В. Єлін, канд. техн. наук,  
П.Ю. Ткач**

Науково-дослідний і проектно-конструкторський  
інститут атомного та енергетичного насособудування  
ВАТ “ВНДІАЕН”, Суми, Україна

**ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА УСТАНОВКА ТА МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕННЯ  
ВПЛИВУ НАДРОТОРНИХ ЕЛЕМЕНТІВ ПЕРЕДВКЛЮЧЕНОГО ОСЬОВОГО КОЛЕСА  
НА КАВІТАЦІЙНО-ЕРОЗІЙНІ ЯКОСТІ ШНЕКОВОВІДЦЕНТРОВОГО СТУПЕНЯ НАСОСА**

**EXPERIMENTAL SETUP AND METHODS OF RESEARCH INFLUENCE OF INDUCER BUSH DESIGN  
ON THE CAVITATION EROSION CHARACTERISTICS OF THE INDUCER CENTRIFUGAL STAGE  
OF THE PUMP**

*Представлено обґрунтування вибору та основні положення методики дослідження через фізичний експеримент впливу надроторних елементів на кавітаційно-ерозійні характеристики шнековідцентрового ступеня насоса. Сформульовані вимоги до експериментальної установки. Обрано критерії оцінки кавітаційно-ерозійних характеристик насосів з шнековідцентровим ступенем. Визначено місця установки датчиків вібрації на об'єкті дослідження. Описано планування експерименту, визначено основні фактори, обґрунтовані їх рівні та інтервали варіювання. Наведено аргументацію вибору додаткового контрольного методу для перевірки адекватності отриманих результатів через оцінки кавітаційно-ерозійних характеристик насосів за допомогою нанесення легкоруйнівних лакових покриттів.*

*Ключові слова: методика проведення експерименту, шнековідцентровий ступінь, надроторні елементи, кавітаційно-ерозійні якості.*

**Вступ**

У міру зростання номінальної частоти обертання промислових відцентрових насосів дослідження, що направлені на підвищення стійкості до кавітаційної ерозії їх робочих органів, представляють все більший науковий та практичний інтерес [1]. Починаючи з 60-х років минулого століття Науково-дослідний та проектно-конструкторський інститут атомного та енергетичного насособудування ВАТ “ВНДІАЕН” (м. Суми, Україна) спеціалізується на створенні перших шнековідцентрових ступенів для промислових насосів різного конструктивного виконання та призначення [2]. На сучасному етапі розвитку високопродуктивних безбустерних живильних насосів атомних електростанцій (АЕС) одним із перспективних шляхів збільшення кавітаційної зносостійкості шнековідцентрового ступеня є інтеграція у його конструкцію негладкої статорної втулки над передвключеним осьовим колесом [3]. Складність процесу кавітаційної ерозії потребує особливої уваги до вибору і обґрунтування методики проведення експериментальних досліджень у цій області [4].

**Постановка задач**

Метою даної статті є обґрунтування вибору методики проведення фізичного експерименту, а також конструкції експериментальної установки по дослідженню впливу надроторних елементів передвключеного осьового колеса на кавітаційно-ерозійні якості шнековідцентрового ступеня насоса.

**Огляд існуючих рішень поставленої задачі**

Наразі основним методом дослідження кавітаційно-ерозійних характеристик гідромашин залишається фізичний експеримент [1, 4]. У роботі [5] виконано огляд та порівняльний аналіз існуючих методів оцінки показників стійкості до кавітаційного зношування стосовно експериментальних досліджень насосів зі шнековідцентровим ступенем. Автором зроблено вибір на користь комбінованого використання методів заміру віброприскорення при зниженні кавітаційного запасу на вході та нанесення легкоруйнівного лакового покриття на поверхню проточної частини ступеня. Перший метод дозволяє оперативіно кількісно оцінювати кавітаційно-ерозійні характеристики досліджуваних об'єктів. Другий метод надає можливість виявляти потенційно небезпечні зони виникнення кавітаційної ерозії, а також за місцем та характером руйнування лакового покриття судити про особливості кавітаційної течії, порівнювати інтенсивність кавітації для різних варіантів робочих органів.

**Актуальність поставленої задачі**

Обґрунтований вибір методики дослідження кавітаційно-ерозійних характеристик шнековідцентрових ступенів насосів з надроторними елементами над передвключеним осьовим колесом забезпечить отримання експериментальних даних, що придатні для використання при проектуванні нового покоління високопродуктивних безбустерних живильних насосів АЕС.

**Вирішення поставленої задачі**

У якості інструменту для вирішення поставленої задачі обрано аналіз попередніх напрацювань ВНДІАЕН щодо методик дослідження кавітаційної стійкості шнековідцентрових ступенів відносно шнековідцентрового ступеня з негладкою статорною втулкою над передвключеним осьовим колесом, що досліджується вперше.

Визначення кавітаційно-ерозійних характеристик робочих органів відцентрових насосів на основі методів, що рекомендуються у публікації [5], передбачає наступні основні вимоги до експериментального стенда і експериментального приладу:

- забезпечення зняття енергетичних та кавітаційних характеристик досліджуваних ступенів у відповідності з ДСТУ ГОСТ 6134-2009 (ISO 9906:1999);
- можливість заміру віброприскорення у характерних точках експериментального приладу;
- широкий діапазон регулювання частоти обертання ротора експериментального приладу;
- швидкість та зручність розбирання експериментального приладу для заміни досліджуваних робочих органів.

На рисунку 1 представлено принципову схему експериментального стенда, а на рисунку 2 зображено конструктивну схему експериментального приладу у відповідності з вищенаведеними вимогами.

Експериментальний стенд працює на технічній воді по замкненому циклу і складається з окремих елементів, показаних на рисунку 1.

Основним елементом стенда є експериментальний прилад — одноступеневий насос з прохідним валом, який виконано з вертикальними роз'ємами, що дозволяє оперативно виконувати заміну робочих органів без повного розбирання насоса (рисунк 2). Приводом експериментального приладу є балансирна машина типу МПБ 423/30, яка забезпечує можливість проведення випробувань на частотах обертання у діапазоні 1000–3000 об/хв.

За показник кавітаційно-ерозійних якостей досліджуваних шнековідцентрових ступенів з негладкою статорною втулкою над осьовим передвключеним колесом планується використовувати порогове значення параметра стійкості до кавітаційної ерозії  $K_{en}$  [3].

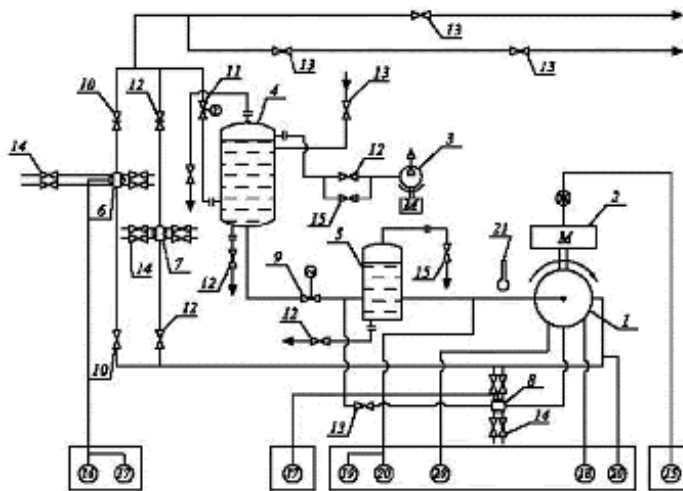


Рисунок 1 — Принципова схема експериментального стенда: 1) експериментальний прилад (насос) 2) Балансирна машина 3) Вакуумний насос; 4) Бак напірний; 5. Бак-заспокоювач; 6. Витратомірний пристрій  $D_y$  150; 7. Витратомірний пристрій  $D_y$  100; 8. Витратомірний пристрій  $D_y$  50; 9. Засувка з електроприводом  $D_y$  300; 10. Засувка  $D_y$  150; 11. Засувка з електроприводом  $D_y$  150; 12. Засувка  $D_y$  100; 13. Вентиль  $D_y$  50; 14. Вентиль запірний сталевий; 15. Вентиль  $D_y$  15; 16. Дифманометр; 17. Дифманометр; 18. Пристрій для вимірювання частоти обертання; 19. Вакуумметр; 20. Манометр; 21. Термометр.

При цьому умова відсутності кавітаційної ерозії набуває вигляду

$$K_e = U_{ш} \cdot \frac{\beta}{\alpha} \cdot D_{ш} < K_{en}, \quad (1)$$

де  $U_{ш}$  — колова швидкість на зовнішньому діаметрі лопатей передвключеного осьового колеса, м/с;  $D_{ш}$  — зовнішній діаметр лопатей передвключеного осьового колеса, м;  $\alpha$  — ступінь масштабу швидкості;  $\beta$  — ступінь масштабу розміру.

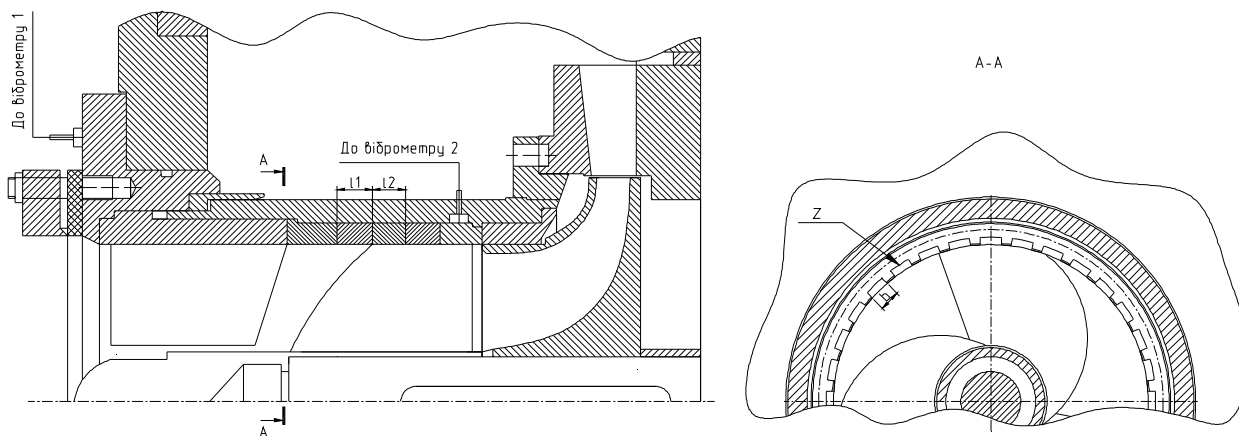


Рисунок 2 — Конструктивна схема експериментального приладу

Залежність інтенсивності кавітаційної ерозії  $I_e$  від геометричних і швидкісних параметрів передвключеного осьового колеса у загальному вигляді визначається за формулою

$$I_e = U_{w_i}^\alpha \cdot D_{w_i}^\beta \quad (2)$$

Свого часу спеціалістами ВНДІАЕН стосовно до передвключених осьових коліс було досліджено характер залежності між віброприскоренням від кавітації та інтенсивністю кавітаційної ерозії. На рисунку 3 проілюстровано алгоритм визначення віброприскорення від кавітації  $w_k$  при зніманні кавітаційної характеристики у вигляді залежності напору ступеня (насоса) від кавітаційного запасу  $H=f(h)$  при постійній витраті  $Q=\text{const}$ . У результаті було встановлено степеневу залежність

$$I_e = w_k^\varphi, \quad (3)$$

де  $\varphi$  — ступінь масштабу віброприскорення.

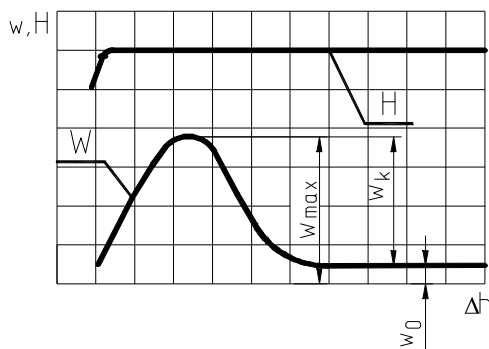


Рисунок 3 — До визначення віброприскорення від кавітації

Прирівнявши праві частини рівнянь (2) і (3) та використовуючи залежність (1), отримуємо

$$K_e = w^\alpha \quad (4)$$

Значення ступенів  $\alpha$ ,  $\beta$  і  $\varphi$  залежить від конкретного типу робочих органів гідромашини. З метою визначення масштабів, що розглядаються, для передвключених осьових коліс різної геометрії у ВНДІАЕН було проведено ряд експериментів на шнеках, виготовлених із одного матеріалу, з фіксованим значенням  $D_{w_i}$ . Упродовж проведення серії ресурсних випробовувань в екстремальних з точки зору кавітаційного зносу факторах (холодна вода, режим з максимальним  $w_k$ ) отримані значення  $\alpha = 6$ ,  $\beta = 3$  і  $\varphi = 2$ . Таким чином, для передвключених осьових коліс залежність (4) приймає вигляд

$$K_e = \sqrt[3]{w_k} \quad (5)$$

Спираючись на залежність (5), порогове значення параметра стійкості до кавітаційної ерозії досліджуваного шнекововідцентрового ступеня з негладкою статор-

ною втулкою над передвключеним осьовим колесом  $K_{en}$  може бути розраховане за формулою

$$K_{en} = K_{en}(\bar{b}) \cdot \sqrt[3]{\frac{w(\bar{b})}{w(i)}}, \quad (6)$$

де  $w(i)$  і  $w(\bar{b})$  — значення віброприскорення від кавітації, відповідно, для шнеку, що досліджується, та для базового (еталонного) шнеку, які випробовуються в ідентичних умовах,  $K_{en}(\bar{b})$  — порогове значення параметру кавітаційної ерозії для базового шнеку.

Отримані у ВНДІАЕН експериментальні значення  $K_{en}(\bar{b})$ , які залежать від конструкції передвключеного осьового колеса і типу середовища, що перекачується, наведено у роботі [5].

Окремого розгляду потребує питання вибору місця установки вібродатчиків для реєстрації віброприскорення від кавітації в експериментальному приладі (рисунок 2). З урахування того, що у залежність (6) входить відношення віброприскорення від кавітації для досліджуваного та базового шнека (з гладкою статорною втулкою), основною вимогою до місцезнаходження вібродатчика є адекватне визначення максимуму у залежності  $w_k=f(\Delta h)$ . Численними дослідженнями встановлено, що місцями, найбільш вразливими до дії кавітаційної ерозії, у передвключеному осьовому колесі є периферійні ділянки лопатей [6]. Як наслідок, максимально інформативною повинна бути установка датчика вібрації безпосередньо на зовнішньому діаметрі шнека. У той же час, замір параметрів вібрації на лопаті передвключеного осьового колеса, що обертається, трудомісткий і технічно складний у реалізації. Тому практичний інтерес представляє можливість адекватного визначення віброприскорення від кавітації шляхом установки датчиків на статорних елементах експериментального приладу. Порівняння експериментальних характеристик шнекововідцентрового ступеня  $w_k=f(\Delta h)$ , отриманих у ВНДІАЕН при розміщенні вібродатчика на поверхні лопаті та на статорній втулці безпосередньо над передвключеним колесом, представлено на рисунку 4. Вплив місцезнаходження точки заміру віброприскорення на корпусі натурального насоса розробки ВНДІАЕН на вигляд залежностей  $w_k=f(\Delta h)$  показано на рисунку 5. Згідно вищевказаних рисунків, кардинальна зміна розміщення датчиків вібрації не впливає на місцезнаходження максимуму на кривих  $w_k=f(\Delta h)$ . Таким чином, при виконанні запланованого дослідження обґрунтованим є розміщення вібродатчиків у експериментальному приладі як безпосередньо на статорній втулці над передвключеним осьовим колесом, так і на фланці вхідного патрубку (рисунок 2).

Для зменшення кількості випробовувань та їх впорядкування при проведенні досліджень буде використано планування експерименту [7]. У якості параметра оптимізації прийнято величину  $w_k$ .

В рамках підготовки планування експерименту, спираючись на отримані раніше дані про вплив негладкої статорної втулки над передвключеним осьовим колесом на енергетичні та кавітаційні характеристики шнекововідцентрового ступеня, які наведено у роботі [8], було зроб-

лено вибір основних досліджуваних факторів, а саме (рис. 2):

- кількість пазів  $z$  у статорній втулці,
- ширина пазів  $b$  у статорній втулці,
- довжина пазів  $l_1$  перед вхідною кромкою лопатей передвключеного осьового колеса (на периферії),
- довжина пазів  $l_2$  за вхідною кромкою лопатей передвключеного осьового колеса (на периферії).

Рівні та інтервали варіювання факторів, які плануються використовувати в ході фізичного експерименту, наведені у таблиці 1.

Приклад матриці планування фізичного експерименту для одного із базових варіантів передвключеного осьового колеса наведено у таблиці 2.

Для компенсації впливу раптових похибок всі досліди за планом експерименту будуть дублюватися.

Після обробки результатів повного багатфакторного експерименту і отримання цільової функції відгуку у вигляді залежності  $w_k = f(z, b, l_1, l_2)$  для одного із базових модельних передвключених осьових коліс виконуватиметься оптимізація матриці планування фізичного експерименту для інших базових модельних передвключених осьових коліс з метою мінімізації кількості дослідів з ними.

За отриманими функціями відгуку для знаходження оптимального значення параметру оптимізації (мінімуму  $w_k$ ) планується використовувати метод крутого сходження, що забезпечує рух до оптимуму за найкоротшим шляхом — градієнтом функції відгуку.

У підсумку на основі функції відгуку з урахуванням формули (6) будуть отримані залежності  $Ken = f(z, b, l_1, l_2)$ , що придатні для використання при проектуванні нового покоління високопродуктивних безбустерних живильних насосів АЕС.

Для підтвердження адекватності результатів, які отримані з використанням методу оцінки кавітаційно-ерозійних якостей досліджуваних ступенів на основі віброприскорення від кавітації, виконуватиметься їх вибірково-якісна перевірка за допомогою методу оцінки кавітаційної стійкості шляхом нанесення легкокоруйнівного лакового покриття для ступенів з найкращими варіантами конструкції надроторних елементів над передвключеним осьовим колесом та їх наступного порівняння з аналогічними результатами для випадку гладкої статорної втулки.

Приклад ідентифікації зон інтенсивного кавітаційно-зношування на поверхні лопаті передвключеного осьового колеса при використанні лакового покриття показано на рисунку 6.

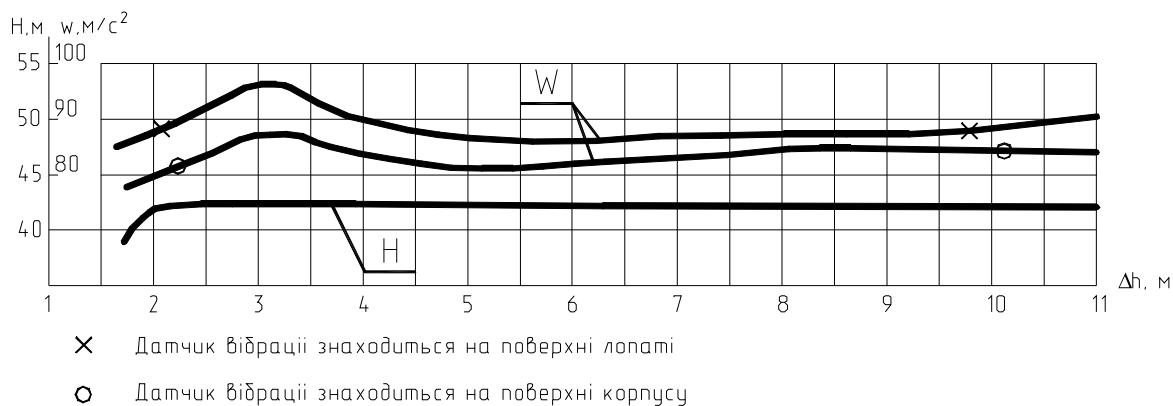


Рисунок 4 — Вплив місця розміщення датчиків вібрації на місцезнаходження максимуму залежності  $w_k = f(h)$  для модельного шнекововідцентрового ступеня

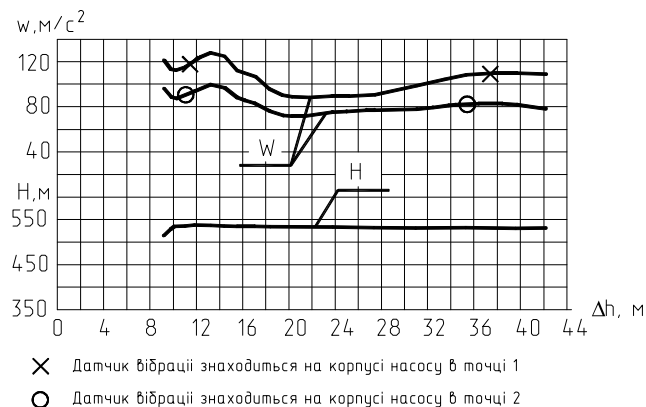
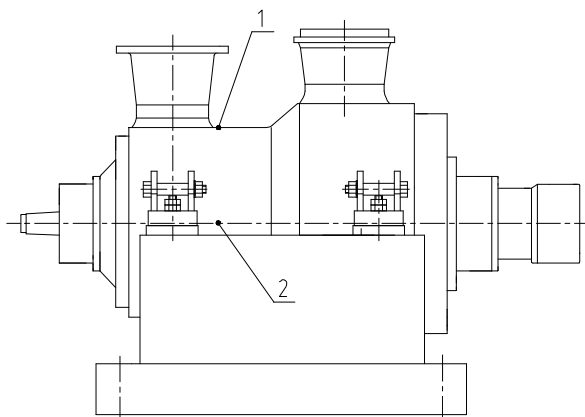


Рисунок 5 — Вплив місця розміщення датчиків вібрації на місцезнаходження максимуму залежності  $w_k = f(h)$  для натурального насоса зі шнекововідцентровим ступенем

Таблиця 1 — Рівні та інтервали варіювання факторів у ході фізичного експерименту

Найменування фактора	Позначення	Інтервал варіювання	Рівень фактора		
			Основний 0	Верхній +	Нижній -
Кількість пазів $z$	X1	8	24	32	16
Ширина пазів $b$ , мм	X2	4	10	14	6
Довжина пазів $l_1$ , мм	X3	20	40	60	20
Довжина пазів $l_2$ , мм	X4	10	30	40	20

Перевага обраної методики полягає у тому, що поєднання планування експерименту і обраного методу дослідження кавітаційно-ерозійних якостей шнековідцентрового ступеня насоса з надроторними елементами над передвключеним осьовим колесом дозволяє отримати адекватні результати у мінімально короткий термін.

Таблиця 2 — Матриця планування фізичного експерименту

Номер досліджу	X0	X1	X2	X3	X4
1	+	+	+	+	+
2	+	-	+	+	+
3	+	+	-	+	+
4	+	-	-	+	+
5	+	+	+	-	+
6	+	-	+	-	+
7	+	+	-	-	+
8	+	-	-	-	+
9	+	+	+	+	-
10	+	-	+	+	-
11	+	+	-	+	-
12	+	-	-	+	-
13	+	+	+	-	-
14	+	-	+	-	-
15	+	+	-	-	-
16	+	-	-	-	-

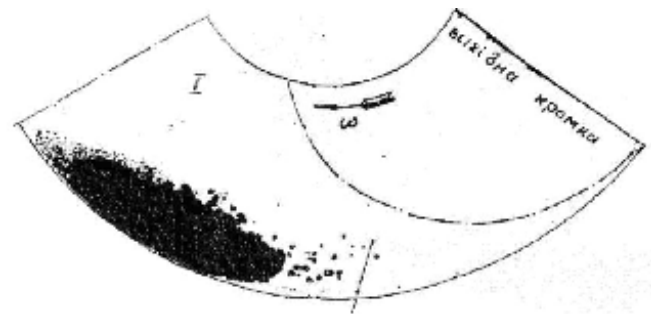


Рисунок 6 — Ідентифікація зон інтенсивного кавітаційного зношування лопаті передвключеного осьового колеса при використанні лакового покриття

Результати дослідження впливу надроторних елементів передвключеного осьового колеса на стійкість шнековідцентрового ступеня до кавітаційної ерозії із застосуванням запропонованої методики і експериментальної установки буде покладено в основу методики створення нового покоління безбустерних живильних насосів АЕС, що наразі розробляється у ВАТ “ВНДІАЕН”.

**Висновки**

1. Сформульовано вимоги до експериментальної установки для дослідження впливу надроторних елементів над осьовим передвключеним колесом на кавітаційно-ерозійні характеристики шнековідцентрового ступеня. Сформовано конструктивний облік експериментального стенда, що відповідає цим вимогам.

2. Обґрунтовано залежність для кількісного оцінювання параметру стійкості шнековідцентрового ступеня до кавітаційної ерозії на основі віброприскорення від кавітації, що реєструється. Доведено припустимість заміру віброприскорення у різних точках статорних елементів експериментального приладу.

3. Запропоновано цільову функцію у вигляді залежності віброприскорення через кавітацію від геометричних параметрів надроторних елементів для дослідів за допомогою планування багатофакторного експерименту. Виконано вибір факторів для дослідження.

#### Література

1. Guelich, J. Centrifugal pumps. — Springer, 2010. — 964 p.
2. Визенков, Г., Твердохлеб, И., Куценко, В., Иванюшин, А., Авдеенко, В. Насосы специального и общепромышленного назначения с предвключенными осевыми колесами. Обзор опыта исследований, разработки и эксплуатации насосов с предвключенным осевым колесом // Насосы и оборудование. — 2008. — №3.- С. 46 — 50.
3. Єлін, О.В., Ткач П.Ю. Кавітаційно-ерозійні якості насосів зі шнекововідцентровим ступенем: сучасний стан проблеми та перспективи розвитку // Промислова гідраліка і пневматика. Всеукраїнський науково-технічний журнал. — 2013. — № 2 (40). — С. 60—66.
4. Bruno, S., Frank, C., Visser. Pump cavitation-various NPSHR criteria, NPSHA margins and impeller life expectancy. — Twenty fourth international pump users symposium, Turbomachinery Laboratory, Texas A&M University, College Station, Texas, USA. — 2008. — 37 p.
5. Ткач, П.Ю. Методи оцінки кавітаційно-ерозійних якостей гідромашин // Вісник СумДУ, серія “Технічні науки”. — 2013. — №4. — С. 91—96.
6. Жуков, В.М. Исследование кавитационного разрушения предвключенных колес центробежных насосов для энергетики. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. — Сумы, 1974. — 199 с.
7. Спиридонов, А.А. Планирование эксперимента при исследовании технологических процессов. — М.: Машиностроение, 1981. — 184 с.
8. Єлін, О.В. Дослідження можливості підвищення всмоктувальної здатності шнекововідцентрового ступеня без зміни геометрії її передвключеного і робочого колеса // Вісник СумДУ, серія “Технічні науки”. — 2013. — №4. — С. 7—16.

#### References

1. Guelich, J. Centrifugal pumps. — Springer, 2010. — 964p.
2. Vizenkov, G., Tverdokhle, I., Kutsenko, V., Ivanyushin, A., Avdeyenko V. Nasosy spetsialnogo i obshchepromyshlennogo naznacheniya s predvkluyuchennymi osevimy kolesami. Obzor opyta issledovaniy, razrabotki i ekspluatatsii nasosov s predvkluyuchennym osevim kolesom // Nasosy i oborudovaniye. — 2008. — №3. — P. 46—50.
3. Yelin, O.V., Tkach, P.Y. Kavitatsiyno-eroziyni yakosti nasosiv zi shnekovovidtsentrovim stupenem: suchasniy stan problemi ta perspektivi rozvitku // Promislova gidravlika i pnevmatika. Vseukraïnskiy naukovo-tekhničniy zhurnal. — 2013.- № 2 (40). — P. 60—66.
- 4 Bruno, S., Frank, C. Visser. Pump cavitation-various NPSHR criteria, NPSHA margins and impeller life expectancy. — Twenty fourth international pump users symposi-

um, Turbomachinery Laboratory, Texas A&M University, College Station, Texas, USA. — 2008. — 37 p.

5. Tkach, P.Y. Metodi otsinki kavitatsiyno-eroziynikh yakostey gidromashin // Visnik SumDU, seriya “Tekhnichni nauki”. — 2013. — №4. — P. 91—96.

6. Zhukov, V.M. Issledovaniye kavitatsionnogo razrushe-niya predvkluyuchennykh koles tsentrobezhnykh nasosov dlya yenergetiki. Dissertatsiya na soiskaniye uchenoy stepeni kandidata tekhnicheskikh nauk. — Sumy, 1974. — 199 p.

7. Spiridonov, A.A. Planirovaniye eksperimenta pri issledovani tekhnologicheskikh protsessov. — M.: Mashinostroyeniye, 1981. — 184 p.

8. Yelin, O.V. Doslidzhennya mozhlivosti pidvishchen-nya vsmoktuvalnoï zdatnosti shnekovovidtsentrovogo stu-penya bez zmini geometrii її peredvkluyuchenogo i robo-chogo kola // Visnik SumDU, seriya “Tekhnichni nauki”. — 2013. — №4. — P. 7—16.

*Надійшла 27.05.2014 року*

УДК 621.65.03

### Экспериментальная установка и методика проведения исследования влияния надроторных элементов предвключенного осевого колеса на кавитационно-эрозионные качества шнекоцентробежной ступени насоса

А.В. Елин, П.Ю. Ткач

Выполнено обоснование выбора и приведены основные положения методики исследования путем физического эксперимента влияния надроторных элементов на кавитационно-эрозионные характеристики шнекоцентробежной ступени насоса. Сформулированы требования к экспериментальной установке. Выбран критерий оценки кавитационно-эрозионных характеристик насосов со шнекоцентробежной ступенью. Определены места установки датчиков вибрации на объекте исследования. Описано планирование эксперимента, определены основные факторы, обоснованы их уровни и интервалы варьирования. Приведена аргументация выбора дополнительного контрольного метода для проверки адекватности полученных результатов путем оценки кавитационно-эрозионных характеристик насосов с помощью нанесения легко разрушаемых лаковых покрытий.

*Ключевые слова: методика проведения эксперимента, шнекоцентробежная ступень, надроторные элементы, кавитационно-эрозионные качества.*

UDC 621.65.03

**Experimental setup and methods of research influence of inducer bush design on the cavitation erosion characteristics of the inducer centrifugal stage of the pump**

**A.V. Yelin, P.Y. Tkach**

This paper presents the selection rationale and fundamental principles of the test procedure for revealing the influence of inducer bush design on the cavitation erosion

characteristics of the inducer centrifugal stage of the pump. Requirements for the experimental setup are formulated. Selected criterion for evaluating cavitation erosion characteristics of pumps with inducer centrifugal stage. Determine the installation of vibration sensors on object of study. Described experimental design, the major factors justified their levels and varying intervals. Arguments of the choice for additional control method to test the adequacy of the results obtained by estimating the cavitation erosion characteristics of pumps by applying easily destructible lacquer coatings.

*Key words: experimental technique, inducer centrifugal stage, inducer bush design, cavitation erosion characteristics.*