

КАВИТАЦІЙНО-ЕРОЗІЙНІ ЯКОСТІ НАСОСІВ ЗІ ШНЕКОВОВІДЦЕНТРОВИМ СТУПЕНЕМ: СУЧАСНИЙ СТАН ПРОБЛЕМИ ТА ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ

Проанализированы существующие научно-методические наработки по достигнутым показателям стойкости шнекоцентробежных ступеней промышленных насосов к кавитационной эрозии на предмет их соответствия современным требованиям, предъявляемым к насосному оборудованию, и выбраны пути дальнейших исследований в этом направлении.

An analysis of the actual scientific and methodological best practices relating to the achieved profit performances of the inducer centrifugal stages of the process pumps to the cavitation erosion for the purpose of their conformity to up-to-date requirements demanded to the pump equipment. The ways of further research in that process have been selected.

Вступ

В Україні на законодавчому рівні закріплено стратегічну задачу підвищення конкурентоспроможності продукції промислового виробництва [1].

Згідно останніх рекомендацій Гідравлічного інституту (США) та Європейської асоціації виробників насосів (Eurpump) світовою насособудівною галуззю за першочергову мету обрано створення нового насосного обладнання з мінімальною вартістю життєвого циклу [2]. Виконання цієї настанови українськими насосовиробниками забезпечить вітчизняній насосній техніці необхідний рівень конкурентоспроможності на внутрішньому та зовнішньому ринку.

На складові вартості життєвого циклу відцентрових насосних агрегатів великої потужності суттєво впливають маса та габаритні розміри обладнання [2]. Використання шнекововідцентрових ступенів дозволяє значно зменшити ці показники за рахунок можливості переходу на більшу частоту обертання ротора насоса [3]. З середини ХХ-го сторіччя шнекововідцентровий насосний ступінь знайшов застосування у ракетно-космічній та авіаційній галузі, де зменшення маси та габаритів устаткування завжди було першочерговою задачею [4]. Згодом, зі зростанням конкуренції між виробниками промислових насосів шнекововідцентрові ступені почали застосовувати і для наземних установок [5]. В наші часи розробкою та виготовленням промислових насосів зі шнекововідцентровими ступенями займаються такі відомі в світі компанії-насосовиробники як Flowserve, KSB, Sulzer, Ebara, Weir Gabbioneta, Goulds pumps, Vogel pumpen, Handol pumps, Peerless pumps, SINI pumps, SPX pumps та інші. В Україні більш ніж півсторічний досвід використання шнекововідцентрових ступенів у промислових насосах мають АТ Сумський завод “Насосенергомаш”, ПАТ “Сумське НВО ім. М.В. Фрунзе” та ВАТ ВНДІАЕН”.

Для відцентрових насосів, що використовуються в тепловій і атомній енергетиці, одним з критеріїв якості є стійкість проточної частини до кавітаційної ерозії, від напрямку якої залежить інтенсивність зношування робочих органів, та, відповідно, термін напрацювання насоса до відмови. Покращення кавітаційно-ерозійної характеристики проточної частини веде до збільшення міжремонтного періоду та зменшення кількості зношених робочих органів протягом усього життєвого циклу насоса.

Отже, дослідження напрямів покращення стійкості до кавітаційної ерозії робочих органів відцентрових насосів, зокрема шнекововідцентрових ступенів, становлять значний науковий і практичний інтерес.

Метою дослідження є аналіз відповідності наявного науково-технічного набуtku щодо досягнутих кавітаційно-ерозійних якостей шнекововідцентрових ступенів промислових насосів сучасним вимогам, які висуваються до насосного обладнання, та визначення шляхів подальших досліджень у цьому напрямі.

Огляд існуючих рішень поставленої задачі

Проблеми кавітаційної ерозії передвключених осьових коліс, які використовуються у насосах рідинно-ракетних двигунів, до цього часу детально не досліджувалися, що може бути пояснено мінімальними вимогами до ресурсу даного обладнання [4, 11]. Найбільш ґрунтовний аналіз з використання суперкавітуючих передвключених осьових коліс для покращення кавітаційно-ерозійних характеристик високообертових насосів тривалої та багаторазової експлуатації проведено у роботі [12]. При цьому розглянуто результати досліджень, виконаних в 70–80-х роках ХХ-го сторіччя японськими та американськими вченими, а також результати робіт, що проводилися у той же період в Калузьському філіалі МВТУ ім. Н.Е. Баумана, Дослідницькому Центрі імені М.В. Келдиша та у НВО “Гідромаш” (Москва).

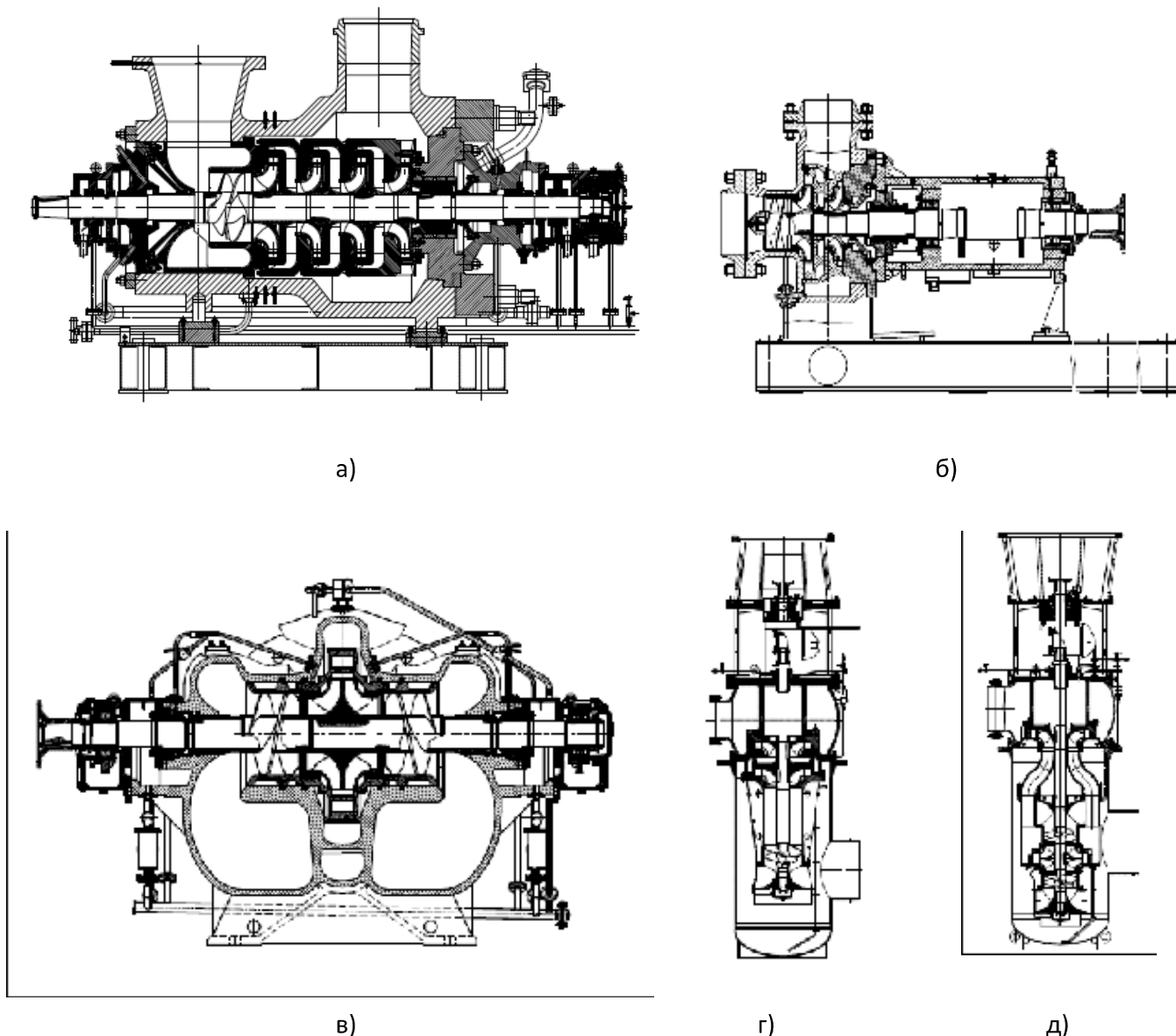


Рис. 1 – Приклади конструктивних схем промислових насосів високої потужності зі шнековідцентровим ступенем, розроблених ВАТ “ВНДІАЕН”: а) живильний насос [6]; б) насос для нафтопереробки [7]; в) нафтовий підпірний насос [8]; г) нафтовий підпірний насос [9]; д) нафтовий підпірний насос [10]

В оглядових працях закордонних дослідників шнековідцентрових ступенів промислових насосів питання стійкості передвключених осьових коліс до кавітаційної ерозії не розглядаються [13, 14]. Відомі лише публікації І.Пірсола початку 70-х років минулого сторіччя щодо застосування режиму суперкавітації для покращення кавітаційно-ерозійних якостей передвключених осьових коліс, які використовуються у відцентрових насосах обробної промисловості для перекачування робочих середовищ з високою температурою кипіння [12, 15].

Результати, які отримано українськими вченими за часів колишнього СРСР у вигляді напрацювань по кавітаційно-ерозійним характеристикам шнековідцентрових ступенів промислових насосів різного призначення, наведено у роботах [3, 5, 16, 17].

Таким чином, можна констатувати, що за останні 20 років нових досліджень, спрямованих на підвищення стійкості шнековідцентрових ступенів до кавітаційної ерозії, не проводилося.

Актуальність поставленої задачі

Забезпечення ресурсу роботи відцентрових робочих коліс не менше 40000 годин без критичних наслідків кавітаційного зношування є однією з основних сучасних вимог до живильних насосів атомних і теплових електростанцій [12]. Живильні насоси, що комплектуються першим шнековідцентровим ступенем, також повинні цілком задовольняти цим умовам.

Вирішення поставленої задачі

В якості інструменту для вирішення поставленої задачі обрано аналіз літературних джерел щодо попередніх напрацювань з питань досягнутих кавітаційно-ерозійних характеристик шнековідцентрових ступенів та пошуку нових перспективних конструкцій шнековідцентрових ступенів з покращеними показниками якості.

На сьогодні для промислових насосів зі шнековідцентровим ступенем, освоєних у виробництві, досягнуто значення критичного кавітаційного коефіцієнту швидкохідності $C_{кр} = 3000$ [3]. Це забезпечується виконанням двох основних вимог до конструкції передвключеного осьового колеса, а саме — можливості створення цим колесом напору, необхідного для безперебійної роботи відцентрового робочого колеса, та підтримка ним напору до найменших значень кавітаційного запасу на вході до насоса.

Принципову схему шнековідцентрового ступеня традиційної конструкції показано на рисунку 2.

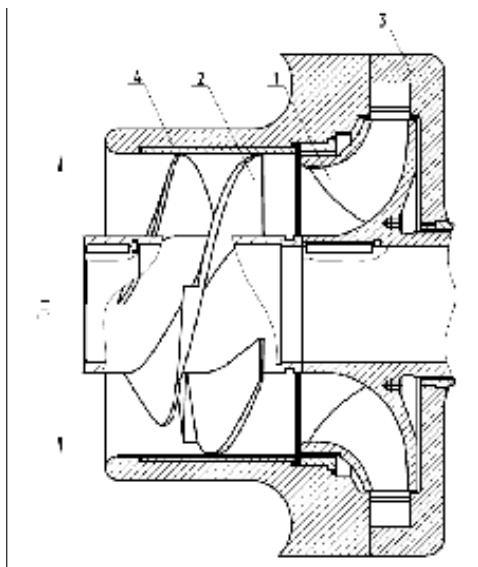


Рисунок 2 — Принципова схема шнековідцентрового ступеня традиційної конструкції:
 1 — передвключене осьове колесо; 2 — відцентрове робоче колесо; 3 — направляючий апарат;
 4 — статорна втулка над передвключеним осьовим колесом

У разі використання в насосі шнековідцентрового ступеня основний знос від кавітаційної ерозії зазнає передвключене осьове колесо [3]. Для того, щоб порівняти ступінь його враження кавітацією, необхідно визначити певний показник, який ускладнює широкий спектр особливостей кавітаційного впливу і властивостей матеріалів. Вітчизняні дослідники у якості такого показника приймають параметр стійкості до кавітаційної ерозії K_e , що обраховується за формулою [3]

$$K_e = U_{ш} \cdot \sqrt{D_{ш}} \quad (1)$$

де $U_{ш}$ — колова швидкість на зовнішньому діаметрі лопатей передвключеного осьового колеса, м/с; $D_{ш}$ — зовнішній діаметр лопатей передвключеного осьового колеса, м.

У випадку, якщо величина параметру K_e є меншою за деяке його порогове значення $K_{e,п}$, кавітаційна ерозія відсутня. У свою чергу порогове значення $K_{e,п}$ залежить від режиму роботи, матеріалу та конструкції передвключеного осьового колеса, типу середовища, яке перекачується, та ін. Отримані у ВНДІАЕН експериментальні значення $K_{e,п}$, що визначаються конструкцією передвключеного осьового колеса та типом рідини, яка перекачується, наведено у таблиці 1 [3].

Дані, які наведено у таблиці 1, отримано при роботі передвключених осьових коліс зі сталі 20Х13Л на воді з температурою 40–60 °С, яку можна вважати за найагресивнішу в кавітаційно-ерозійному відношенні рідину.

Використання експериментальних показників $K_{e,п}$ забезпечило можливість створення на базі першого однопоточного шнековідцентрового ступеня за розробками ВНДІАЕН цілої низки вітчизняних безбустерних головних живильних насосів атомних електростанцій (АЕС), які не мають аналогів у світі (рисунок 1, а) [17]. Перелік типорозмірів вказаних насосів та об'єм їх випуску українськими підприємствами з середини 1960-х років і до нашого часу наведено у таблиці 2 [18, 19].

Практичні потреби сьогодення вимагають перегляду досягнутих кавітаційно-ерозійних якостей живильних насосів зі шнековідцентровим ступенем. Наразі у Росії триває будівництво нових блоків АЕС з реакторами ВВЭР-1200, у найближчому майбутньому планується будівництво нових АЕС з реакторами ВВЭР-1300, у середньостроковій перспективі — з реакторами ВВЭР-1500. Збільшення одиничної потужності блоку АЕС зі

Таблиця 1 — Вплив конструкції передвключеного осьового колеса та роду рідини, що перекачується, на порогове значення параметра кавітаційної ерозії $K_{e,п}$

№ з/п	Характеристика лопатевої системи передвключеного осьового колеса	Значення $K_{e,п}$		
		вода $t < 50^\circ\text{C}$	вода $t > 150^\circ\text{C}$	нафта
1	Профіль лопаті — пластина або дужка кола	9	22	25
2	Профіль лопаті — пластина або дужка кола зі збільшеним радіальним зазором	12	30	-
3	Лопать з виступом на тильній поверхні	20	-	-

Таблиця 2 — Номенклатура та об'єм випуску безбустерних головних живильних насосів АЕС розробки ВНДІАЕН на базі першого однопоточного шнековідцентрового ступеня

№ з/п	Тип реактора АЕС	Типорозмір насоса	Кількість виготовлених насосів
1	ВВЭР-440, в т.ч.: Нововоронізька АЕС (Росія) Кольська АЕС (Росія) Рівненська АЕС (Україна) Армянська АЕС (Вірменія) АЕС “Козлодуй” (Болгарія) АЕС “Ловіза” (Фінляндія) АЕС “Пакш” (Угорщина)	ПЭА 850-65 (ПЭ 850-65) [18]	100
			10
			20
			10
			10
			20
			10
2	РБМК-1000, в т.ч.: Ленінградська АЕС (Росія), Смоленська АЕС (Росія), Курська АЕС (Росія), Чорнобильська АЕС (Україна)	ПЭА 1650-75 (СПЭ 1650-75) [18]	75
			20
			15
			20
3	РБМК-1500 Ігналінська АЕС (Литва)	ПЭА 1650-80	14
4	ВВЭР-1000 Тяньваньська АЕС (Китай)	ПЭА 1650-80-1 [19]	10
5	ВВЭР-1000 АЕС “Куданкулам” (Індія)	ПЭА 1650-80-2 [19]	4 (пускорезервні)

збереженням кількості працюючих головних живильних насосів призводить до підвищення їх номінальної подачі. Окрім цього в останні роки до живильних насосів АЕС висувуються вимоги надійної тривалої роботи у широкому інтервалі подач — від 20 до 130 % від номінальної подачі, а також роботи без обмежень по часу на живильній воді з температурою від 110 °С.

Беручи до уваги формулу (1) та враховуючи дані таблиці 1 та 2, стає очевидним, що досягнутих раніше показників стійкості перших шнековідцентрових ступенів до кавітаційної ерозії замало для забезпечення надійної роботи нового покоління безбустерних живильних насосів АЕС з подачею до 3000 м³/год. Є потреба у розробці нових конструкцій шнековідцентрових ступенів з пороговим значенням параметра кавітаційної ерозії при роботі на холодній воді щонайменше на рівні $K_{en} = 25$.

Очевидним вирішенням проблеми підвищення стійкості шнековідцентрового ступеня живильного насоса до кавітаційно-ерозійного зносу є використання схеми з розділенням потоку на вході до насоса через вико-

ристання першого ступеня з робочим колесом двостороннього входу та двох передвключених осьових коліс на половинну подачу (рисунок 1, д). Такий спосіб гарантовано суттєво знижує інтенсивність кавітаційно-ерозійного зносу шнековідцентрового ступеня, але призводить до значного ускладнення конструкції насоса, збільшення його габаритів та маси.

Аналіз робіт [3, 5, 13, 14] свідчить, що резерви покращення кавітаційно-ерозійних характеристик шнековідцентрових ступенів промислових насосів лише за рахунок геометрії лопатевої системи передвключеного осьового колеса без суттєвого зниження величини $S_{кр}$ та економічності або збільшення габаритів вичерпані. Найбільш доцільним є подальший пошук можливостей впливу на стійкість передвключеного осьового колеса до кавітаційного зношування за рахунок інших елементів шнековідцентрового ступеня. Оскільки кавітаційна ерозія найчастіше проявляється на периферійних ділянках передвключеного осьового колеса, то у першу чергу увагу слід приділити саме надроторним елементам останнього.

Попередніми дослідниками шнековідцентрових ступенів було встановлено значний вплив на інтенсивність кавітаційної ерозії величини радіального зазору між передвключеним осьовим колесом та корпусом насоса [16, 20]. Розробники передвключеного осьовихорового ступеня завдяки розміщенню на периферії осьового колеса (шнека) нерухомої гвинтової лопатевої решітки, осьовий хід якої протилежний ходу гвинтової лінії лопаті шнека, отримали ефект зменшення вібрації та шуму, які зазвичай супроводжують процес кавітаційного зношування [21].

З урахуванням вищевказаного було виконано огляд останніх публікацій, присвячених дослідженню впливу надроторних елементів передвключеного осьового колеса на характеристики шнековідцентрового ступеня.

У традиційній конструкції шнековідцентрового ступеня внутрішня поверхня статорної втулки над передвключеним осьовим колесом виконується гладкою (рисунком 2). Останнім десятиріччям японськими вченими досліджено вплив негладкої статорної втулки над передвключеним осьовим колесом на характеристики та робочий процес шнековідцентрового ступеня 22–25.

Так, для насосів рідинно-ракетних двигунів визначено вплив неглибоких подовжніх пазів, виконаних на внутрішній поверхні статорної втулки над передвключеним осьовим колесом, на енергетичні та кавітаційні характеристики шнековідцентрового ступеня 22 — 24. Принципову схему шнековідцентрового ступеня нетрадиційної конструкції, що досліджувався, показано на рисунку 3, а.

Для низки конфігурацій пазів на статорній втулці отримано підвищення значення $C_{кр}$ шнековідцентрового ступеня. На подачі Q , що відповідає максимальній економічності ступеня, досягнуто зниження припустимого кавітаційного запасу ступеня NPSHR до 20%, на режимі 1,2Q—до 35%. При цьому абсолютне зниження економічності ступеня не перевищило 1,2%. Отриманий ефект

пояснюється подавленням за рахунок подовжніх пазів на статорній втулці деяких видів кавітаційних течій у передвключеному осьовому колесі, зокрема вихорової кавітації зворотних струмів.

У роботі [25] спеціалісти японської фірми Ebara на прикладі багатоступеневого промислового насоса з першим шнековідцентровим ступенем, що працює на скрапленому газі, проаналізували вплив на енергетичні та кавітаційні характеристики насоса п'ятизахідних гвинтових канавок, що виконано у напрямку, протилежному обертанню ротора, на внутрішній поверхні статорної втулки над передвключеним осьовим колесом (рисунком 3, б). У порівнянні з гладкою статорною втулкою на оптимальній подачі Q отримано зниження величини NPSHR насоса на 15%, на режимі 1,2Q — на 40%. При цьому абсолютне збільшення економічності насоса склало 2%.

Вищенаведені результати досліджень різних авторів свідчать про перспективність пошуків шляхів подальшого покращення кавітаційних характеристик шнековідцентрового ступеня за рахунок позитивного ефекту від вторинних течій при нетрадиційному виконанні надроторних елементів передвключеного осьового колеса. Перевага даного технічного рішення над існуючими полягає у можливості суттєвого покращення показників якості шнековідцентрового ступеня з передвключеними осьовими колесами традиційної конструкції зі збереженням його масогабаритних характеристик.

Приклади застосування отриманих результатів

Дослідження впливу надроторних елементів передвключеного осьового колеса на стійкість шнековідцентрового ступеня на кавітаційну ерозію планується обрати предметом окремої роботи. При цьому необхідно розв'язати наступні задачі:

- розробити математичну модель течії у шнековідцентровому ступені з негладкою статорною втулкою над передвключеним осьовим колесом;

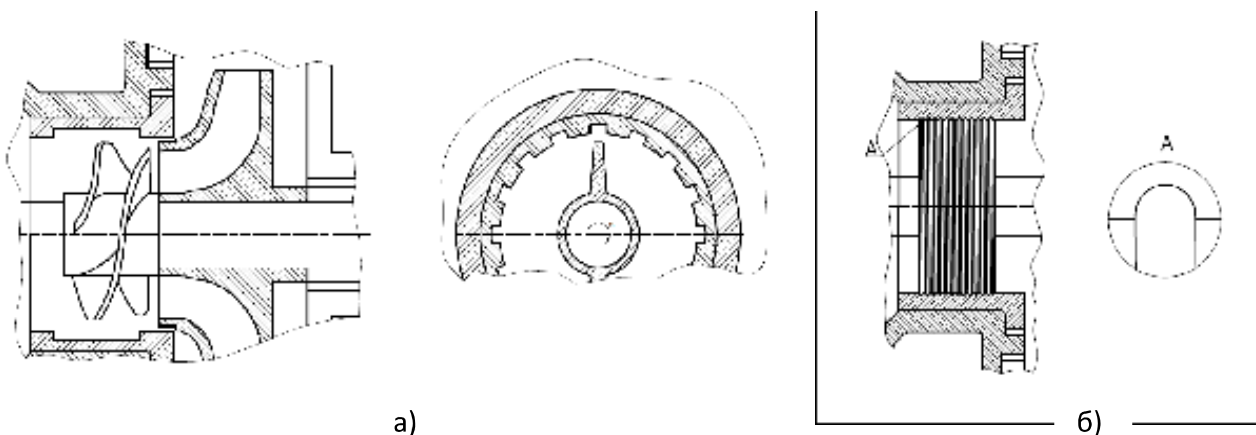


Рисунок 3 — Принципова схема шнековідцентрового ступеня нетрадиційної конструкції з негладкою статорною втулкою над передвключеним осьовим колесом:
 а) статорна втулка з внутрішньою поверхнею у вигляді прямих подовжніх пазів;
 б) статорна втулка з внутрішньою поверхнею зі зворотньою гвинтовою нарізкою

- розробити схему процесу кавітаційної ерозії в шнековідцентровому ступені з негладкою статорною втулкою над передвключеним осьовим колесом;

- перевірити адекватність розробленої математичної моделі експериментально;

- розробити рекомендації до проектування шнековідцентрового ступеня нетрадиційної конструкції з високими кавітаційно-ерозійними якостями.

За технічний об'єкт майбутнього дослідження доцільно обрати модельний шнековідцентровий ступінь з коефіцієнтом швидкохідності $n_s=120$ на базі перед

включених осьових коліс, що мають традиційну для безбустерних живильних насосів АЕС конструкцію.

Для вирішення поставлених задач планується використати такі засоби дослідження течії у шнековідцентровому ступені, як розрахунковий експеримент за допомогою одного з програмних продуктів чисельної гідродинаміки (з попередньою перевіркою адекватності його використання) та фізичний експеримент на модельному стенді.

Методи оцінки кавітаційно-ерозійних якостей шнековідцентрових ступенів з негладкою статорною втулкою над передвключеним осьовим колесом, які доцільно обрати, це методи, що раніше успішно використовувалися попередніми дослідниками у ВНДІАЕН, а саме — вимірювання вібраційної швидкості статорної втулки над передвключеним осьовим колесом та використання легкоуїнівного лакового покриття для нанесення на елементи проточної частини ступеня.

Висновки

1. Існує практична необхідність створення шнековідцентрових ступенів нетрадиційної конструкції для нового покоління безбустерних живильних насосів АЕС, оскільки кавітаційно-ерозійні характеристики існуючих конструкцій шнековідцентрових ступенів не відповідають сучасним вимогам по збільшенню одиничної продуктивності даного насосного обладнання.

2. Результати досліджень, проведених у ВНДІАЕН, та досвід експлуатуючих організацій свідчать, що кавітаційне зношування при використанні шнековідцентрового ступеня найчастіше виникає на периферійних ділянках лопатей передвключеного осьового колеса. З урахуванням цього перспективно вважається можливість подальшого підвищення кавітаційно-ерозійних якостей шнековідцентрового ступеня саме за рахунок надторних елементів передвключеного осьового колеса.

3. Сформульовано низку задач, які необхідно розв'язати у подальшій роботі. Обрано технічний об'єкт, способи та засоби майбутнього дослідження, за допомогою яких визначатимуться кавітаційно-ерозійні якості шнековідцентрового ступеня з негладкою статорною втулкою над передвключеним осьовим колесом.

Література

1. Закон України "Про пріоритетні напрями розвитку науки і техніки". <http://zakon4.rada.gov.ua/laws/show/2623-14>.

2. Frenning, L. Pump life cycle costs: A guide to LCC analysis for pumping systems. — Hydraulic institute & Europump, 2001. — 194 p.

3. Ржебаева, Н.К. Шнеко-центробежная ступень насоса: методические указания к курсовому и дипломному проектированию / Н.К. Ржебаева, В.М. Жуков, В.А. Куценко. — Харьков: Кафедра гидравлических машин Сумского филиала Харьковского политехнического института, 1990. — 40 с.

4. Шапиро, А.С. Структура реального течения в центробежных и осевых насосах. — М: МГИУ, 2004. — 280 с.

5. Насосы специального и общепромышленного назначения с предвключенными осевыми колесами. Обзор опыта исследований, разработки и эксплуатации насосов с предвключенным осевым колесом / [Г. Визенков, И. Твердохлеб, В. Куценко и др.] // Насосы и оборудование. — 2008. — №3. — С. 46—50.

6. Єлін, О.В. Патент на корисну модель "Багатоступеневий відцентровий насос" UA 71459 U / Єлін О.В., Лугова С.О. Єлін В.К. // Електронна версія акумулятивного офіційного бюллетня "Промислова власність". — 10.07.2012, №13 (на сайті [www://ukrpatent.org](http://ukrpatent.org)).

7. Лясін, О.Ф. Патент на корисну модель "Відцентровий насос" UA 75431 U / О.Ф. Лясін, В.О. Полікаренко, М.І. Цвик та ін. // Електронна версія акумулятивного офіційного бюллетня "Промислова власність". — 26.11.2012, №22 (на сайті [www://ukrpatent.org](http://ukrpatent.org)).

8. Волченко, Г.Г. Патент на корисну модель "Вертикальний відцентровий насос" UA 17675 U / Г.Г. Волченко, В.В. Белов, В.О. Куценко та ін. // Промислова власність. — 2006. — Бюл. №10. — С. 5.125.

9. Волченко, Г.Г. Патент на корисну модель "Вертикальний відцентровий насос" UA 59209 U / Г.Г. Волченко, В.К. Єлін, В.О. Куценко та ін. // Промислова власність. — 2011. — Бюл. №9. — С. 5.85.

10. Елин, А.В. Агрегаты электронасосные для нефти и нефтепродуктов: номенклатурный каталог ОАО "ВНИ-ИАЭН" / А.В. Елин, Н.А. Бойко, В.В. Дубоделова. — Сумы: АС-Полиграф. — 2007. — 16 с.

11. Лакшминараяна, В. Гидродинамика входных устройств // Теоретические основы инженерных расчетов. — Т. 104. — 1982. — №4. — С. 66—87.

12. Чумаченко, Б.Н. Теоретические основы и экспериментальные исследования с целью создания проточных частей лопатных насосов, обеспечивающих сочетание высоких КПД, всасывающей способности и низкого уровня вибрации. Дисс. на соиск. научн. степ. д.т.н. — Москва. — 2002. — 411 с.

13. Kowalik, M. Inducer — state of the art // World pumps. — February 1993. — P. 32—35.

14. Guelich, J. Centrifugal pumps. — Springer, 2010. — 964 p.

15. Пирсол, И. Кавитация. — М.: Мир, 1975. — 95 с.

16. Жаров, Г.А. Методы защиты предвключенных колес от кавитационной эрозии / Г.А. Жаров, В.М. Жуков, В.А. Купенко // “Лопастные насосы” под ред. Л.П. Грянюк и А.Н. Папира. — Л.: Машиностроение, 1975. — С. 209—217.

17. Applying feed pump systems without boosters in NPPs / I. Tverdokhleby, G. Vizenkov, A. Birukov and other // Nuclear Exchange. — November, 2012. — pp. 31—33.

18. Пак, П.Н. Насосное оборудование атомных электростанций / П.Н. Пак, А.Я. Белоусов, С.П. Пак. — М.: Энергоатомиздат, 2003. — 449 с.

19. Елин, В.К. Питательные насосы для АЭС с блоками ВВЭР-1000 / В.К. Елин, Н.В. Коровниченко // Труды 11-й международной научно-технической конференции “Герметичность, виброненадежность и экологическая безопасность насосного и компрессорного оборудования — ГЕРВИКОН-2005”. — Сумы: СумГУ., 2005. — Т. 1. — 145—153 с.

20. Алмазов, А.В. Кавитационное виброненагружение высокооборотных осевых насосов / А.В. Алмазов, З.Т. Дроздов // Сб. научных трудов “Кавитационные автоколебания и динамика двухфазных систем” под ред. В.В. Пилипенко. — К.: Наукова думка, 1985. — С. 41—46.

21. А.А., Анкудинов. Расчет и проектирование предвключенной осевыхревой ступени центробежного насоса: учебное пособие. — М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2003. — 64 с.

22. Imamura, H. Suppression of cavitation flow in inducer by J-groove / Imamura H., Kurokawa J., Matsui J. and other // Fifth international symposium on cavitation (CAV2003). — November 1-4, 2003, Osaka, Japan.

23. Kurokawa, J. Suppression of cavitation in inducer by J-groove (in Japanese) / Kurokawa J., Imamura H., Choi Y. and other // Turbomachinery. — 2005. — Vol. 33. — №10. — pp. 592 — 600.

24. Shimia, N. Suppression of cavitation instabilities in an inducer by J-groove / Shimia N., Fujii A., Horiguchi H. and other // Sixth international symposium on cavitation (CAV2006). — September, 2006, Wageningen, Netherlands.

25. Alison-Youel S. Improved centrifugal pump performance with counter helical inducer housing grooves. — 4 p. <http://www.ebaraintl.com/technical-papers/improved-centrifugal-pump-performance-with-counter-helical-inducer-housing-grooves>.

Надійшла 4.05.2013 року