

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

**ЛЕБЕДЄВ АНТОН ЮРІЙОВИЧ**



УДК 66.023

**ПІДВИЩЕННЯ ВИХІДНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЛАБІРИНТНО-ГВИНТОВИХ  
НАСОСІВ ШЛЯХОМ ВИЗНАЧЕННЯ ЇХ РАЦІОНАЛЬНИХ ПАРАМЕТРІВ**

Спеціальність 05.05.17 – гідравлічні машини та гідропневмоагрегати

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Харків 2016

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі гідропневмоавтоматики і гідроприводу Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник – доктор технічних наук, професор  
**Андренко Павло Миколайович**,  
Національний технічний університет  
«Харківський політехнічний інститут»,  
професор кафедри гідропневмоавтоматики і  
гідроприводу

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор  
**Зайончковський Геннадій Йосипович**,  
Національний авіаційний університет,  
завідувач кафедри гідрогазових систем

кандидат технічних наук  
**Лугова Світлана Олегівна**,  
АТ «Сумський завод «Насосенергомаш»,  
начальник відділу проточних частин

Захист відбудеться «30» червня 2016 р. о 14<sup>30</sup> годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.050.11 в Національному технічному університеті «Харківський політехнічний інститут» за адресою: 61002, м. Харків, вул. Фрунзе, 21.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» за адресою: 61002, м. Харків, вул. Фрунзе, 21.

Автореферат розісланий «\_\_\_» травня 2016 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради



Юдін Ю.О.

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Сучасний рівень і подальший розвиток техніки нерозривно пов'язані з інтенсифікацією роботи гідравлічних систем та агрегатів, підвищенням їх технічного рівня і конкурентоспроможності. Стосовно лабіринтно-гвинтових насосів (ЛГН), які знайшли широке застосування в хімічній промисловості і нафтовидобутку та використовуються при значеннях коефіцієнта швидкохідності  $n_s = 10 \dots 40$  доцільним є підвищення їх робочих характеристик, надійності та енергозбереження на основі кращих методів проектування і дослідження.

Завдяки особливостям робочого процесу і відсутності механічного тертя деталей сфера можливого використання ЛГН при роботі на агресивних середовищах значно ширша порівняно з насосами з аналогічним  $n_s$ . На сьогодні фізика робочого процесу ЛГН недостатньо досліджена, а розрахунок їх робочих характеристик базується на використанні емпіричних коефіцієнтів, що визначені експериментальним шляхом. Існуючі конструкції ЛГН потребують подальшого удосконалення стійкої роботи на РР з великим газовмістом, створення енергоефективної конструкції ЛГН. Теоретико-експериментальний аналіз існуючих конструкцій ЛГН, методів їх розрахунку та проектування дозволяє визначити ряд особливостей, без урахування яких неможливо підвищити їх технічний рівень. Для цього необхідно уточнити фізичну модель робочого процесу, розробити теорію розрахунку та проектування, яка дозволяє виконувати розрахунок без емпіричних коефіцієнтів, враховувати при математичному описі гідродинамічних процесів, які відбуваються в ЛГН, характеристики робочої рідини (РР), що змінюються в процесі функціонування, її газовміст при роботі ЛГН в якості вхідного ступеня занурювальних насосів, що використовуються при нафтовидобутку.

Викладене вище зумовлює актуальність вибраної теми дисертації, спрямованої на вирішення науково-практичної задачі – покращення вихідних характеристик лабіринтно-гвинтового насоса шляхом розробки теорії робочого процесу на базі узагальненої фізичної моделі, створення методики проектування, яка базується на багатокритеріальній оптимізації параметрів, що є підґрунтям для підвищення технічного рівня та удосконалення конструкції.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Робота виконувалась на кафедрі гідропневмоавтоматики і гідроприводу НТУ «ХПІ» у рамках держбюджетної науково-дослідної роботи МОН України «Удосконалення гідравлічних і пневматичних силових систем і систем керування промислового призначення» (ДР № 0186U012831) та договорами про науково-технічне співробітництво із ТОВ «Промгідропривод» (м. Харків) і СП ЗАТ «ХЕМЗ-ІРЕС» (м. Харків), де здобувач брав участь як виконавець.

**Мета і задачі дослідження.** Метою дисертаційної роботи є покращення вихідних характеристик ЛГН шляхом визначення раціональних параметрів, що дозволить підвищити ККД та розширити сферу роботи на газорідних сумішах.

Для досягнення поставленої мети сформульовані завдання:

1. Узагальнити фізичну модель робочого процесу ЛГН і на цій основі розробити теорію розрахунку та методику проектування ЛГН, яка дозволяє

виконувати розрахунки без використання емпіричних коефіцієнтів. Запропонувати безрозмірні критерії для оцінки характеристик та технічного рівня.

2. Розробити тривимірну математичну модель робочого процесу ЛГН на основі врахування особливостей течії РР в проточній частині.

3. Теоретико-експериментально виявити закономірності та особливості робочих процесів, що відбуваються в ЛГН при роботі у складі насосного гідроагрегату (ГА).

4. Визначити герметичність торцевого ущільнення при гармонічних вимушених коливаннях корпусу.

5. Оцінити надійність ЛГН на основі результатів теоретичних та експериментальних досліджень.

6. Удосконалити конструкцію робочих органів ЛГН за рахунок дослідження течії РР в проточній частині.

7. Експериментальним шляхом довести адекватність розробленої теорії визначення характеристик ЛГН, встановити вплив газовмісту РР на його робочі характеристики та показники технічного рівня.

8. Розробити методику проектування ЛГН на основі багатокритеріальної оптимізації. Визначити технічний рівень ЛГН з удосконаленими робочими органами.

*Об'єктом дослідження є гідродинамічні процеси, що відбуваються в ЛГН.*

*Предметом дослідження є функціональні залежності вихідних характеристик ЛГН у складі гідроагрегату, які впливають на показники його технічного рівня.*

*Методи досліджень.* Теоретичні дослідження проводились з використанням теорії автоматичного керування, методів математичного моделювання, на основі класичних рівнянь механіки рідини та газу (рівняння Рейнольдса, нерозривності, переносу характеристик турбулентності і рівняння динаміки гідромеханічних систем). Математичні моделі є сукупністю нелінійних алгебричних, диференціальних рівнянь у часткових та повних похідних. Вірогідність наукових результатів роботи обумовлена застосуванням апробованих методів дослідження, відповідністю прийнятих припущень характеру розв'язуваних задач, адекватністю математичних моделей, обґрунтованим вибором контрольно-вимірювальної апаратури і методів обробки експериментальних даних із застосуванням теорії планування експерименту, методів математичної статистики і теорії малих вибірок. Адекватність математичних моделей перевірялася порівнянням результатів чисельного розрахунку з результатами даних фізичного експерименту. Експериментальні дослідження проводилися на стенді випробувань занурювальних ГА у лабораторії СП ЗАТ «ХЕМЗ–ІРЕС» (м. Харків).

#### **Наукова новизна отриманих результатів:**

– вперше розроблено теорію робочого процесу лабіринтно-гвинтових насосів на базі узагальненої фізичної моделі, яка враховує втрати, пов'язані з перетіканням робочої рідини між гвинтовими канавками, та дозволяє виконувати розрахунки без емпіричних коефіцієнтів і комплексно враховувати нестационарність гідродинамічних процесів, стисливість та двофазність робочої рідини, форму проточної частини;

– вперше розроблено тривимірну математичну модель робочого процесу лабіринтно-гвинтового насоса для дослідження течії робочої рідини в проточній частині;

– запропоновано нові безрозмірні критерії для оцінки робочих характеристик лабіринтно-гвинтових насосів – питомі: напір, витрата, потужність та ККД. Це дозволяє на етапі проектування оцінити ефективність та технічний рівень лабіринтно-гвинтових насосів, визначити оптимальні робочі параметри;

– на основі теоретичних та експериментальних досліджень узагальнено закономірності та особливості робочих процесів в лабіринтно-гвинтовому насосі:

- вперше встановлено вплив газовмісту робочої рідини на робочі характеристики лабіринтно-гвинтового насоса, визначено граничну межу газовмісту робочої рідини, яка становить 32 %.

- визначено значення критичного числа Рейнольдса для робочих органів з напівкруглою формою гвинтової канавки,  $Re_{кр} = 630$ ;

- вперше отримано аналітичні залежності для визначення запасу герметичності торцевого ущільнення лабіринтно-гвинтового насоса, перевантаження від частоти вібрації його корпусу, при якому почнуться витoki крізь ущільнення, та мінімальне навантаження, при якому можлива його розгерметизація;

– отримала подальший розвиток теорія оптимізації робочих параметрів лабіринтно-гвинтових насосів, яка враховує форму проточної частини і параметри робочої рідини.

**Практичне значення отриманих результатів** для машинобудування полягає у розробці методики розрахунку та проектування ЛГН, що містить багатокритеріальну оптимізацію параметрів, удосконаленні конструкції і підвищенні технічного рівня. Розроблено нові конструкції робочих органів ЛГН (патенти № 68863, 73119), розрахунковим та експериментальним шляхом доведено їх високу ефективність. Розроблено методики розрахунку граничного значення критерію кавітації, миттєвої подачі ЛГН і її нерівномірності та його надійності, які підвищують точність визначення характеристик. Встановлено технічний рівень запропонованих ЛГН та визначено шляхи підвищення за рахунок удосконалення проточної частини.

Результати досліджень і розроблені методики розрахунку та проектування, нові конструктивні рішення ЛГН впроваджено у проектно-конструкторські роботи ПАТ «ХЕМЗ–ІРЕС» (м. Харків), ТОВ «Промгідропривод» (м. Харків) та ТОВ «Харківгазобладнання» (м. Харків), що дозволило проектувати ЛГН високого технічного рівня.

Розроблену методику розрахунку та проектування ЛГН впроваджено у навчальний процес кафедри гідропневмоавтоматики і гідроприводу НТУ «ХП» при вивченні курсу «Гідродинамічні машини і передачі» та кафедри прикладної гідроаеромеханіки СумДУ при вивченні курсів «Гідропривод і гідропневмоатоматика» і «Надійність та експлуатація гідро- і пневмомашин» для студентів спеціальності 6.050502 «Гідравлічні машини, гідроприводи та гідропневмоавтоматика».

**Особистий внесок здобувача.** Положення і результати, що виносяться на захист дисертаційної роботи, отримані здобувачем особисто. Серед них: узагальнення фізичної моделі робочого процесу ЛГН, участь у розробці удосконалених конструкцій, обґрунтування планів і проведення досліджень, розробка тривимірної математичної моделі течії РР, розробка методики надійності, показників технічного рівня, багатокритеріальної оптимізації параметрів ЛГН та узагальнення результатів теоретико-експериментальних досліджень, участь у впровадженні.

**Апробація результатів дисертації.** Основні положення і результати дисертації доповідались й обговорювались на: Міжнародних науково-практичних конференціях «Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я» (м. Харків, 2011 р., 2012 р., 2015 р.); Міжнародних науково-технічних конференціях «Гідроаеромеханіка в інженерній практиці» (м. Черкаси, 2012 р., м. Київ, 2013 р.); Міжнародних науково-технічних конференціях Асоціації фахівців промислової гідравліки і пневматики (АС ПГП) (м. Донецьк, 2011 р., м. Чернігів, 2012 р., м. Мелітополь, 2014 р.); Міжнародній науково-технічній конференції студентів та аспірантів «Гідромашини, гідроприводи та гідропневоавтоматика» (м. Москва, 2011 р.); Всеукраїнській міжвузівській науково-технічній конференції «Сучасні технології в промисловому виробництві» (м. Суми, 2012 р.); XXXV Семковських молодіжних вчених читаннях (м. Харків, 2015 р.). У повному обсязі дисертаційна робота доповідалася та схвалена на засіданні XVI Міжнародної науково-технічної конференції АС ПГП (м. Суми, 2015 р.) та на засіданні кафедри прикладної гідроаеромеханіки СумДУ (м. Суми, 2015 р.).

**Публікації.** За темою дисертаційної роботи опубліковано 27 наукових робіт, з яких: 11 статей у наукових фахових виданнях України (2 – у міжнародних наукометричних базах), 3 статті в іноземних періодичних фахових виданнях, 2 патенти України, 11 – у матеріалах конференцій.

**Структура і обсяг роботи.** Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел інформації, додатків. Загальний обсяг роботи становить 191 сторінку, з них 40 рисунків по тексту, 12 рисунків на 9 окремих сторінках, 13 таблиць за текстом, 6 таблиць на окремих сторінках, список використаних джерел інформації налічує 138 найменувань на 15 сторінках, додатки на 41 сторінці.

## **ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ**

**У вступі** сформульовано науково-практичну задачу, її актуальність мету і завдання дослідження, подано відомості про наукові та практичні результати.

**У першому розділі** виконано аналітичний огляд тенденцій розвитку, технічного рівня та методів розрахунку і проектування ЛГН. Визначено, що створення сучасної теорії розрахунку та проектування ЛГН з урахуванням максимальної кількості раніше не врахованих факторів дозволить отримати ЛГН з суттєво поліпшеними робочими характеристиками, підвищити їх конкурентоспроможність і технічний рівень, стійкість роботи на РР з великим газомістом та розширити сферу використання.

Значний внесок у дослідження процесів в ЛГН зробили вчені Голубєв А.І., Глікман Б.Ф., Євтушенко О.А., Зайончковський Г.Й., Лур'є З.Я., Луговський О.Ф., Марцинковський В.А., Попов Д.М., Струтинський В.Б., Сьомін Д.О., Ковальов І.О., Кононенко А.П., Мочалін Є.В., Панченко А.І., Склярєвський О.М., Турік В.М., Фінкельштейн З.Л., Яхно О.М., Гусак О.Г., Неня В.Г., Нестеренко В.Б., Grabowa G. та ін.

Проведений аналіз науково-технічних джерел дозволив сформулювати вимоги до перспективного ЛГН. Встановлено, що розробка методики розрахунку, яка враховує особливості робочого процесу ЛГН, дозволить на етапі проектування обґрунтовано обирати його конструктивні і робочі параметри, підвищити технічний рівень. Визначено параметри РР, урахування яких дозволить підвищити точність розрахунку нестационарних гідродинамічних процесів, що відбуваються в ЛГН. Обґрунтовано потребу в комплексній оцінці технічного рівня ЛГН з урахуванням раціональної кількості показників, які несуть різносторонню інформативність стосовно його технічних параметрів, умов експлуатації, ремонту тощо.

Вирішення цих питань визначило мету і задачі досліджень, що наведені у загальній характеристиці роботи.

**У другому розділі** узагальнено фізичну модель робочого процесу ЛГН, яка покладена в основу теорії розрахунку та проектування, що не містять емпіричних коефіцієнтів, та тривимірну математичну модель течії РР в проточній частині ЛГН.

Запропоновано при роботі ЛГН – базової конструкції (ЛГН тип-І) досліджувати рух РР у двох протилежних напрямках: від входу насоса до виходу (прямий потік), який відбувається в гвинтових канавках та обумовлений обертанням гвинта; від виходу насоса на його вхід (зворотний потік), який протікає крізь зазор між виступом втулки та нарізкою гвинта під дією перепаду тиску між виходом та входом насоса і дією ваги РР, у випадку негоризонтального його розташування. Врахування перетікання РР крізь радіальний зазор між нарізками гвинта та втулки запропоновано вперше.

Згідно з уточненою фізичною моделлю робочого процесу ЛГН середня витрата на виході

$$q_{\text{сер}} = z[q_1(n) - q_2(\Delta p_{\text{вих}})], \quad (1)$$

де  $z$  – кількість заходів гвинта;  $q_1$  – витрата, обумовлена переміщенням об'єму РР, яка знаходиться в гвинтовій канавці насоса, за один оборот гвинта;  $q_2$  – витрата, обумовлена течією РР, яка знаходиться в канавці насоса, крізь щілину, утворену виступом на втулці та западинами гвинта, під дією перепаду тиску на вході та виході насоса  $\Delta p_{\text{вих}}$  та власної ваги, у разі негоризонтального розташування насоса.

На базі узагальненої фізичної моделі робочого процесу ЛГН та згідно із сформульованими вимогами до його перспективної конструкції запропоновано дві удосконалені конструкції проточних частин його робочих органів. Перша удосконалена конструкція ЛГН (тип-ІІ), (рис. 1), відрізняється тим, що на вході і виході втулки та гвинта в гвинтових канавках виконано фаски, довжина яких дорівнює чотирьом гідралічним радіусам гвинтової канавки втулки та гвинта. При цьому фаски на вході втулки та гвинта виконано у вигляді конфузора, з кутом конусності  $20^\circ \dots 60^\circ$ , а фаски зі сторони камер відводу – у вигляді дифузора з кутом

конусності  $8^\circ \dots 15^\circ$ . Кромки на вході та виході гвинтових канавок втулки і гвинта виконано тупими. Таке виконання забезпечує максимальне зменшення гідравлічних втрат у ЛГН та вихороутворення РР, підвищує енергоефективність.

Особливістю другої удосконаленої конструкції ЛГН (тип-III) (рис. 2), є виконання гвинтових канавок на гвинті довгастої форми, у вигляді еліпса, вісь яких утворює з віссю гвинта, у напрямку подачі РР, гострий кут  $\alpha = 40^\circ \dots 50^\circ$ , та ширина яких в розрізі на зовнішній поверхні гвинта дорівнює ширині гвинтових канавок на внутрішній поверхні втулки чи чотирьом гідравлічним радіусам гвинтової канавки втулки, а кромки на вході та виході гвинтових канавок виконано тупими. Це дозволяє збільшити коефіцієнт діодності (різного гідравлічного опору у прямому та зворотному напрямках руху РР) при перетіканні РР крізь радіальний зазор між канавками втулки та гвинта за рахунок утворення вихорів різної інтенсивності при її руху у прямому та зворотному напрямку.

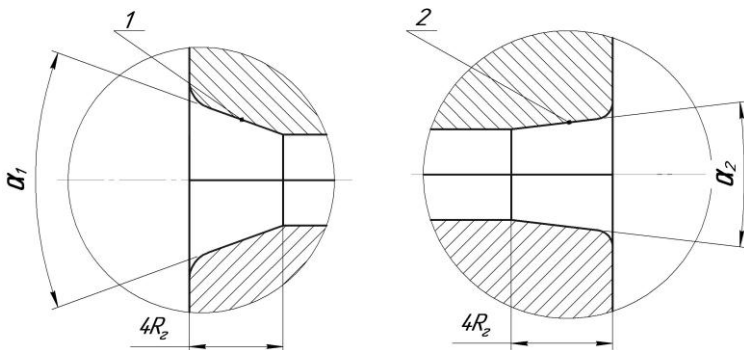


Рисунок 1 – ЛГН типу-II: 1 – фаска біля вхідної порожнини; 2 – фаска біля вихідної порожнини

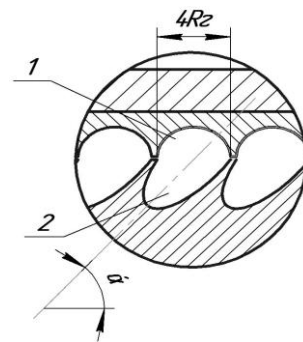


Рисунок 2 – ЛГН типу-III:  
1 – гвинтова канавка втулки;  
2 – гвинтова канавка гвинта

Розроблену універсальну методику розрахунку основних робочих характеристик ЛГН, блок-схему розрахунку однієї з них, а саме витратної характеристики  $H = f(q_{\text{сер}})$ , представлено на рис. 3, де  $H$  – напір на виході з ЛГН.

Теоретичним шляхом встановлено значення  $Re_{\text{кр}}$  для ЛГН з робочими органами з напівкруглою канавкою, яке становить 630. Запропонований підхід може бути використаний для визначення  $Re_{\text{кр}}$  ЛГН з робочими органами різної форми.

Для розрахунку дійсної  $P$  потужності і ККД  $\eta$  отримані аналітичні залежності використання яких дозволяє підвищити точність визначення:

$$P = q_{\text{сер}} \Delta p_{\text{вих}}, \quad (2)$$

$$\eta = \frac{q_{\text{сер}} \Delta p_{\text{вих}}}{P_{\text{т}}} = \frac{30 q_{\text{сер}}}{\pi^2 R_{\text{т}}^2 d_{\text{гв}} n \text{ctg} \alpha}, \quad (3)$$

де  $P_{\text{т}}$  – теоретична потужність, Вт;  $R_{\text{т}}$  і  $d_{\text{гв}}$  – відповідно гідравлічний радіус гвинтової канавки і діаметр гвинта, м;  $n$  – частота обертання гвинта,  $\text{с}^{-1}$ ;  $\alpha$  – кут нарізок по відношенню до осі гвинта, градуси чи рад.

Теоретичним шляхом отримано аналітичні залежності для розрахунку миттєвої подачі  $q_{\Sigma}(t)$  та коефіцієнта нерівномірності подачі ЛГН  $\delta_{\text{т.н}}$ :



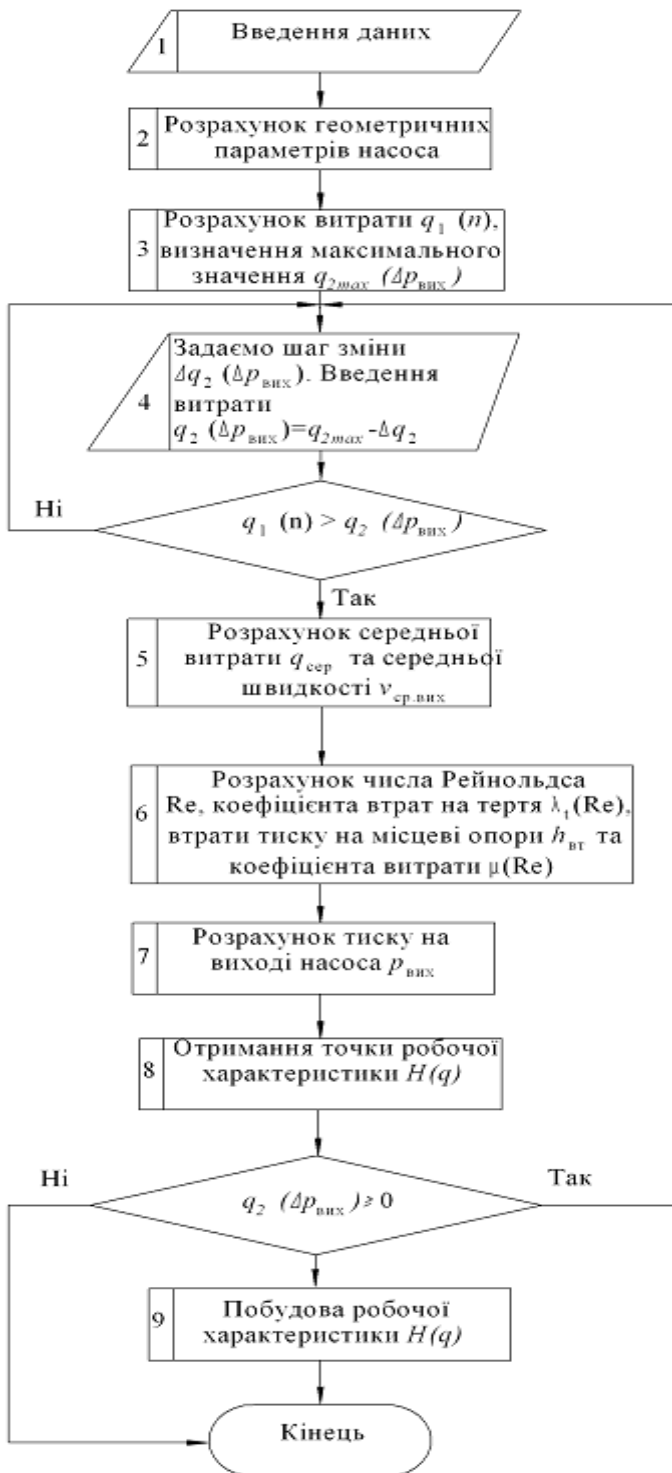


Рисунок 3 – Блок-схема розрахунку витратної характеристики ЛГН

OpenFOAM (OpenCFD Ltd) розроблено тривимірну математичну модель течії РР в проточній частині, яку покладено в основу дослідження робочих процесів ЛГН. Приймалось, що одна вісь співпадає з віссю ЛГН, втулка насоса знаходиться у нерухомому стані, втулка та гвинт абсолютно жорсткі. РР – ньютонівська, в'язка нестислива, а течія – ізотермічна, для якої коефіцієнт динамічної в'язкості є величиною сталою. Рівняння руху та нерозривності РР описується рівняннями:

$$q_{\Sigma}(t) = z[q_1(\varphi(t)) - q_2(\Delta p_{\text{вих}})]; \quad (4)$$

$$\delta_{\text{т.н}} = \frac{4(4R_r + b)}{\pi L_k \bar{n} - 2(4R_r + b)}, \quad (5)$$

де  $\varphi$  – кут повороту гвинта, градуси чи рад;  $b$  – ширина верхівок гвинта у поперечному розрізі, м;  $L_k$  – довжина гвинтової лінії, м;  $\bar{n}$  – відносна частота обертання гвинта.

За результатами чисельного розрахунку встановлено, що коефіцієнт нерівномірності подачі ЛГН  $\delta_{\text{т.н}}$  зростає зі збільшенням гідравлічного радіуса  $R_r$  та ширини верхівок гвинта у поперечному перерізі  $b$  і зворотно пропорційний довжині гвинтової лінії  $L_k$  та частоті обертання гвинта  $n$ . Отримано максимальне значення коефіцієнта нерівномірності подачі ЛГН, яке становить  $\delta_{\text{т.н}} = 3,897 \cdot 10^{-4}$ , що на порядок менше ніж у гвинтових насосах.

Запропоновано для оцінки характеристик ЛГН і форми робочих органів використовувати параметри: питомий напір  $\tilde{H}$ , питому витрату  $\tilde{q}$ , питому потужність  $\tilde{P}$ , питомий ККД  $\tilde{\eta}$ :

$$\tilde{H} = \frac{H}{z l_b / R_r}; \quad \tilde{q} = \frac{q_{\text{сер}}}{z l_b / R_r};$$

$$\tilde{P} = \frac{P}{z l_b / R_r}; \quad \tilde{\eta} = \frac{\eta}{z l_b / R_r}, \quad (6)$$

де  $l_b$  – довжина гвинта, м.

У програмному комплексі

$$\frac{\partial \bar{V}}{\partial t} + (\bar{V} \cdot \nabla) \bar{V} = \bar{F} - \frac{1}{\rho} \overline{\text{grad} p} + v_{\text{eff}} \nabla^2 \bar{V}; \quad \text{div} \bar{V} = 0, \quad (7)$$

де  $\bar{V}$  – швидкість РР;  $\nabla$  – оператор Гамільтона;  $\bar{F}$  – головний вектор масових сил, що припадають на одиницю маси РР і мають розмірність прискорення;  $\rho$  – густина РР;  $v_{\text{eff}} = v_t + v_T$ ,  $v_t$  та  $v_T$  – відповідно молекулярна і турбулентна (вихрова) кінематичні в'язкості РР.

Для замикання математичної моделі використано модифіковану двошарову « $k - \omega$ » модель турбулентності переносу зсувних напруг Ментера

$$v_T = \frac{a_1 k}{\max(a_1 \omega, \Omega, F_2)}, \quad (8)$$

де  $a_1 = 0,31$  – емпіричний коефіцієнт;  $k$  – кінетична енергія турбулентності;  $\omega$  – питома (в одиниці об'єму) швидкість дисипації;  $\Omega$  – абсолютна величина завихреності;  $F_2$  – змішувальна функція:

$$F_2 = \tanh \left[ \left[ \max \left( \frac{2\sqrt{k}}{\beta^* \omega y}, \frac{500v}{y^2 \omega} \right) \right]^2 \right], \quad (9)$$

де  $y$  – відстань від стінки;  $\beta^*$  – константа, яка дорівнює 0,075.

Зміна в часі й просторі кінетичної енергії турбулентності й питомої швидкості її дисипації описуються рівняннями переносу характеристик турбулентності:

$$\begin{cases} \frac{\partial k}{\partial t} + V_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = P_k - \beta^* k \omega + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ (v + \sigma_{k1} v_T) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right], \\ \frac{\partial \omega}{\partial t} + V_j \frac{\partial \omega}{\partial x_j} = a \Omega^2 - \beta \omega + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ (v + \sigma_{\omega 1} v_T) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + 2(1 - F_1) \sigma_{\omega 2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j}, \end{cases} \quad (10)$$

де  $P_k = \min \left( \tau_{ij} \frac{\partial V_i}{\partial x_j}, 10\beta^* k \omega \right)$  – генеративний турбулентний член;

$F_1 = \tanh \left\{ \min \left[ \max \left( \frac{\sqrt{k}}{\beta^* \omega y}, \frac{500v}{y^2 \omega} \right), \frac{4\sigma_{\omega 2} k}{CD_{k\omega} y^2} \right]^4 \right\}$  – емпірична функція;

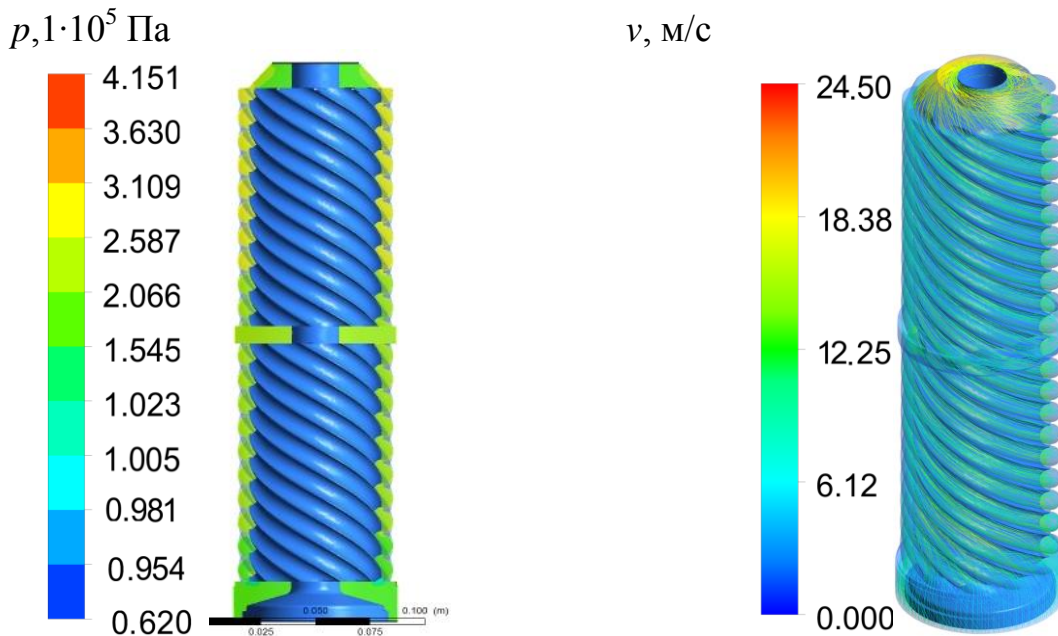
$CD_{k\omega} = \max \left( 2\rho \sigma_{\omega 2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j}, 10^{-10} \right)$  – позитивна частина перехресних дифузійних

членів.

Математичне моделювання течії РР у насосі проводилося при визначених значеннях констант моделі турбулентності. Рівняння (8), (9), (11) розглядали разом з початковими умовами розподілу проекцій швидкостей в області течії в початковий момент часу  $t_0$ . Як граничні умови прийнято, що на твердих стінках швидкості РР, внаслідок її прилипання, дорівнює нулю. РР має густину –  $\rho = 920 \text{ кг/м}^3$ , кінематичну в'язкість –  $\nu_t = 25 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ , температуру –  $T = 80^\circ \text{C}$ , вміст повітря –

0,8 %. Тиск на вході в насос дорівнює атмосферному. Робочі органи насоса мають такі розміри: втулка з номінальною внутрішньою розточкою діаметра – 62 мм, кроком нарізки одного гвинта – 112 мм, нарізка ліва; гвинт з зовнішнім діаметром 61 мм, кроком нарізки одного гвинта – 112 мм,  $z = 10$ ,  $l_b = 112$  мм, нарізка ліва; гвинтові канавки мають напівкруглу форму; радіальний зазор між втулкою та гвинтом – 0,5 мм;  $R_r = 2,25$  мм. Гвинт обертається з частотою – 2900 об/хв. Розташування насоса вертикальне.

Розв'язання гідродинамічної задачі проводилось у програмному комплексі з відкритим вихідним кодом OpenFOAM (OpenCFD Ltd). За результатами математичного моделювання отримано розподіл тиску вздовж насоса та лінії течії РР в гвинтових канавках у різні проміжки часу. На рис. 4 показано вихід на усталений режим,  $Re = 1191$ . Встановлено, що після виходу насоса на усталений режим роботи на його виході спостерігається пульсація витрати, рис. 5.



а) Розподіл тиску вздовж насоса      б) Лінії течії РР у гвинтових канавках ЛГН  
Рисунок 4 – Математичне моделювання течії РР в проточній частині ЛГН типу-І

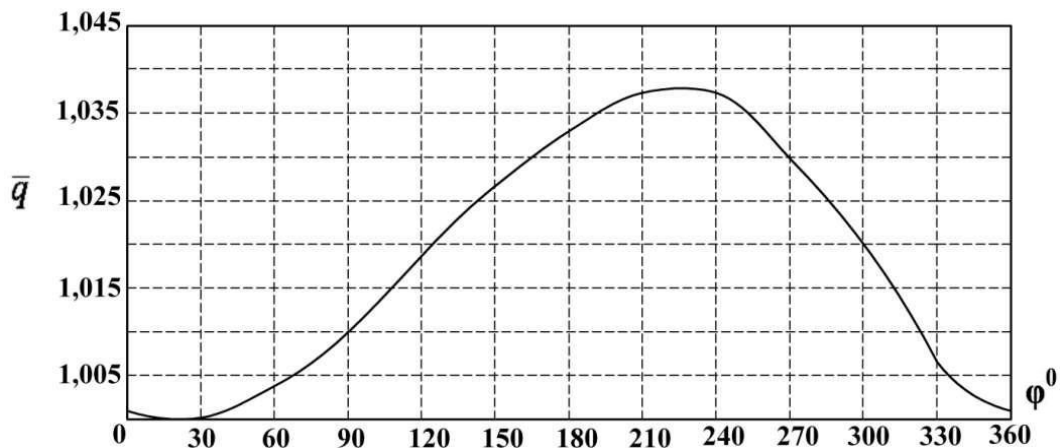


Рисунок 5 – Пульсація відносної витрати ( $\bar{q}(\varphi) = q(\varphi)/q_{\min}$ ) на виході ЛГН типу-І за один оборот гвинта в усталеному режимі

У третьому розділі наведено результати експериментальних досліджень ЛГН, описано стенд, методики проведення та обробки результатів досліджень. Обґрунтовано вибір приладів та контрольно-вимірювальної апаратури. Розроблено план другого порядку двофакторного активного експерименту ЛГН, що дозволило зменшити кількість дослідів. При проведенні експериментальних досліджень записувалися осцилограми пульсацій тиску. Використовувалися електричні датчики тиску, які було вмонтовано у стенд, та багатоканальний вимірювальний комплекс, створений на базі ноутбука, (рис. 6).



Рисунок 6 – Загальний вигляд експериментального стенда та багатоканального вимірювального комплексу для дослідження ЛГН

Експериментально отримано значення функцій відклику – робочих характеристики насосів через натуральні значення факторів, які використані при визначенні раціональних конструктивних параметрів та параметрів робочого процесу:

– для ЛГН типу-I

$$H_I = 24,523 - 0,171q + 0,328q_{\text{пов}} - 0,0011qq_{\text{пов}} + 0,00017q^2 - 0,017q_{\text{пов}}^2; \quad (11)$$

– для ЛГН типу-II

$$H_{II} = 26,103 - 0,239q + 0,106q_{\text{пов}} - 0,001qq_{\text{пов}} + 0,0009q^2 - 0,0035q_{\text{пов}}^2, \quad (12)$$

де  $H_i$  – напір на виході з насоса, м;  $q$  – витрата РР на вході ЛГН, м<sup>3</sup>/добу;  $q_{\text{пов}}$  – витрата повітря, приведена до умов на виході з насоса, м<sup>3</sup>/добу.

Проведений аналіз функцій відклику  $H_i$  (2), (3) дозволив встановити, що при атмосферному тиску на виході з насоса та забезпеченні безкавітаційної його роботи ЛГН типу-II може перекачувати газорідну суміш без зриву подачі, в якій вміст повітря становить біля 30 %, а ЛГН типу-I – біля 14 %. Експериментально доведено ефективність використання ЛГН типу-II порівняно з типом-I, (рис. 7, 8). Удосконалення робочих органів одного ступеня ЛГН дозволило на 30 % збільшити ККД та практично вдвічі напір, а ККД та напір насосного агрегату з ЛГН типу-II на вході зросли відповідно на 8 і 13 %.

В ході експериментальних досліджень отримано осцилограми пульсацій тиску ЛГН типу-I та ЛГН типу-II, одну з яких наведено на рис. 9. В пакеті MathCad за розробленою програмою за амплітудами пульсацій тиску  $\Delta\tilde{p}_m$ , знятими у  $m$  точках

осцилограм за період  $2\pi$ , побудовані гармонічні криві пульсацій тиску на вході і виході з насоса. Встановлено реальне значення пульсацій тиску на виході з ЛГН. При газовмісті в межах 10 ... 15 % пульсація тиску на виході ЛГН типу-II на 30 % менша ніж ЛГН типу-I. Зі збільшенням газовмісту РР пульсації тиску на виході з ЛГН зменшуються. Похибка між експериментально визначеними пульсаціями тиску та теоретичними не перевищує 2 %.

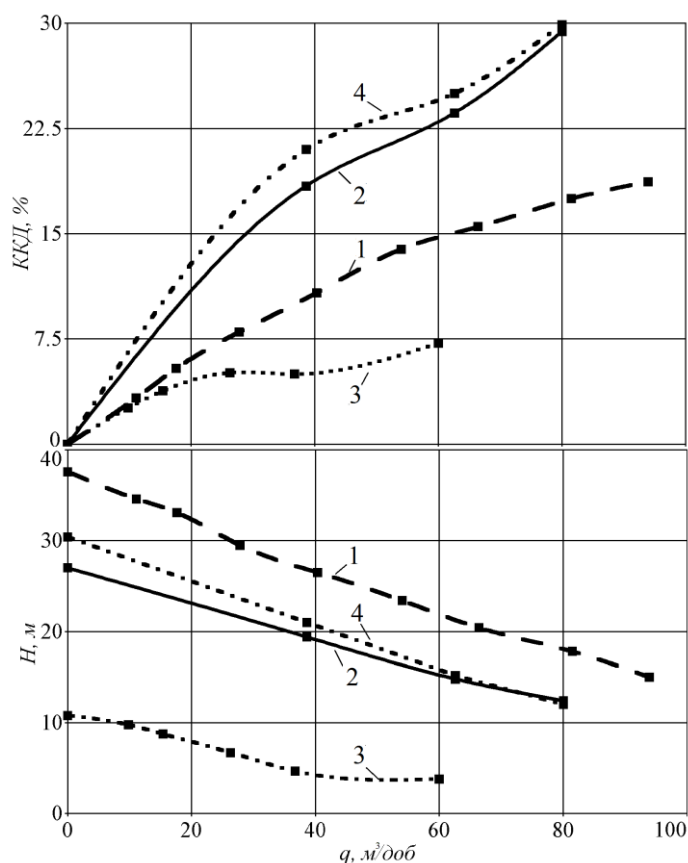


Рисунок 7 – Експериментальні дослідження ЛГН з різними формами робочих органів:

1 – два ступеня ЛГН типу-I;  
 2 – ЛГН типу-II; 3 – ЛГН типу-I;  
 4 – ЛГН типу-II (теоретичний розрахунок).

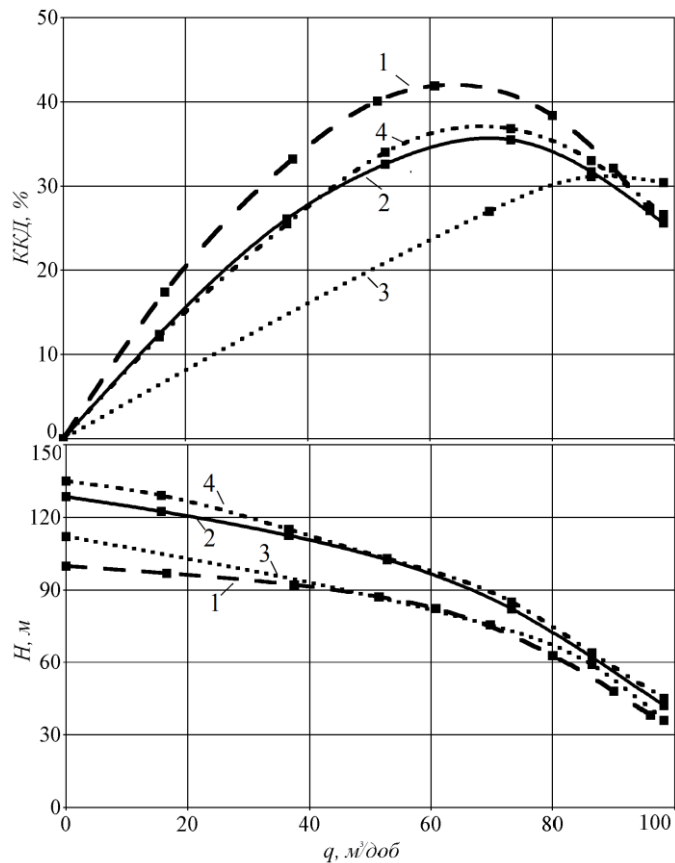


Рисунок 8 – Експериментальні дослідження роботи 19-и ступенів відцентрового насоса:

1 – без ЛГН;  
 2 – з ЛГН типу-II; 3 – з ЛГН типу-I;  
 4 – з ЛГН типу-II (теоретичний розрахунок).

З урахуванням максимальної кількості факторів розроблена функціональна модель стенда для випробувань ЛГН при їх роботі на газорідній суміші разом з математичною моделлю роботи насоса дозволяє визначити робочі характеристики ЛГН залежно від конструктивних розмірів, інших факторів, скоротити час проектування.

У четвертому розділі наведено методику проектування ЛГН, в тому числі і методики багатокритеріальної оптимізації параметрів, оцінки надійності та визначення герметичності торцевого ущільнення ЛГН. Отримано аналітичні залежності для визначення запасу герметичності торцевого ущільнення ЛГН при гармонічних вимушених коливаннях корпусу. За результатами розрахунків встановлено, що для реальних умов роботи ЛГН торцеве ущільнення має високу

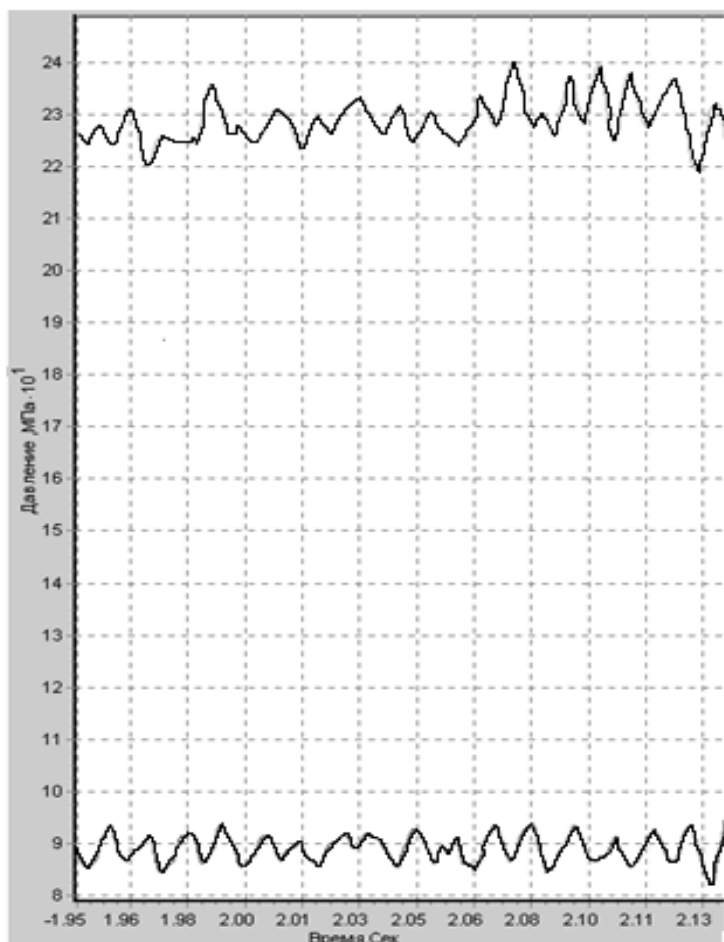


Рисунок 9– Осцилограма зміни тиску ЛГН типу-І при витраті на виході з насоса –  $q = 72, \text{ м}^3/\text{доб}$ ; витраті повітря –  $q_{\text{пов}} = 6,6, \text{ м}^3/\text{доб}$ : нижня крива – тиск на вході в насос; верхня – тиск на виході з насоса

чином ЛГН є високонадійним ГА.

Багатокритеріальна оптимізація ЛГН проведена методом дослідження простору параметрів на базі ЛП<sub>т</sub> послідовності. Як критерії оптимізації використано наступні співвідношення:

$$\tilde{\eta} = \frac{\eta}{z l_{\text{в}}/R_{\text{Г}}} \rightarrow \max, \quad \tilde{H} = \frac{H}{z l_{\text{в}}/R_{\text{Г}}} \rightarrow \max, \quad \tilde{q} = \frac{q_{\text{сер}}}{z l_{\text{в}}/R_{\text{Г}}} \rightarrow \max, \quad (13)$$

для яких вирішується задача максимізації.

В якості варійованих параметрів ЛГН при відповідних параметричних обмеженнях обрано:  $x_1 = R_{\text{Г}}$ , м;  $x_2 = \delta$  – радіальний зазор, м;  $x_3 = s_{\text{ГВ}}$  – крок гвинтової канавки, м;  $x_4 = l_{\text{в}}$ , м;  $x_5 = d_{\text{ГВ}}$  – зовнішній діаметр втулки, м;  $x_6 = \alpha$ ;  $x_7 = z$ .

Як функціональні обмеження прийнято залежності, що визначають працездатність ЛГН та взаємозв'язки параметрів між собою, наприклад обмеження коефіцієнта діодності.

У результаті розв'язання оптимізаційної задачі (13) отримали результати, що наведені в (табл. 1–3). Встановлено, що найбільш розроблені конструкції ЛГН типу–ІІ та ЛГН типу–ІІІ мають кращі критерії якості. Завдяки проведенню

надійність і зберігаючи герметичність по тиску, що в 2,5 ... 3 рази перевищує його максимальне значення. Для виключення ймовірності розгерметизації торцевого ущільнення треба уникати режимів роботи ЛГН, коли частота коливання його корпусу становить близько 400 Гц (співпадає з частотою власних коливань ущільнення).

Визначено числові характеристики показників надійності ЛГН. Методом експертних оцінок встановлено, що при проектуванні ЛГН доцільно насамперед забезпечити зменшення зношення виступів нарізок втулки та гвинта. Ймовірність безвідмовної роботи ЛГН, яка розрахована методами марковської апроксимації та структурних схем для 4500 годин становить 0,891.

Встановлено, що мінімальне значення ймовірності безвідмовної роботи насоса за 10 000 годин становить 0,984, а час безвідмовної роботи  $1,46 \cdot 10^6$  годин. Таким

оптимізації параметрів ЛГН зменшується час на проектування, підвищуються показники технічного рівня. Доведено, що використання розроблених конструкцій ЛГН дозволяє підвищити ККД, напір і технічний рівень.

Таблиця 1 – Вибірка із таблиці досліджень параметрів ЛГН типу-I

Номер точки	Параметри ЛГН							Критерії якості			
	$R_r \cdot 10^{-3}$ , м	$\delta \cdot 10^{-4}$ , м	$s_{ГВ}$ , м	$l_{ГВ}$ , м	$d_B$ , м	$\alpha$ , град	$z$	$\tilde{H}$	$\tilde{q}$	$\tilde{\eta}$	$\eta$
4	1,40	9,63	0,071	0,116	0,075	83,22	10,48	0,098	0,129	0,062	21,5
7	2,02	8,94	0,07	0,132	0,08	70,71	6,04	0,115	0,156	0,071	34,9
12	1,74	7,41	0,07	0,128	0,074	51,81	11,22	0,125	0,164	0,092	36,8
16	1,02	5,64	0,07	0,110	0,08	67,57	7,37	0,078	0,176	0,097	38,6

Таблиця 2 – Вибірка із таблиці досліджень параметрів ЛГН типу-II

Номер точки	Параметри ЛГН							Критерії якості			
	$R_r \cdot 10^{-3}$ , м	$\delta \cdot 10^{-4}$ , м	$s_{ГВ}$ , м	$l_{ГВ}$ , м	$d_B$ , м	$\alpha$ , град	$z$	$\tilde{H}$	$\tilde{q}$	$\tilde{\eta}$	$\eta$
3	2,43	5,68	0,070	0,136	0,071	76,93	10,52	0,112	0,180	0,093	27,5
6	1,15	8,05	0,071	0,105	0,074	80,08	10,03	0,114	0,190	0,101	29,1
10	2,02	8,94	0,070	0,132	0,080	70,71	6,04	0,129	0,194	0,108	31,9
14	1,02	5,64	0,070	0,11	0,080	67,57	7,37	0,08	0,210	0,115	46,1

Таблиця 3 – Вибірка із таблиці досліджень параметрів ЛГН типу-III

Номер точки	Параметри ЛГН							Критерії якості			
	$R_r \cdot 10^{-3}$ , м	$\delta \cdot 10^{-4}$ , м	$s_{ГВ}$ , м	$l_{ГВ}$ , м	$d_B$ , м	$\alpha$ , град	$z$	$\tilde{H}$	$\tilde{q}$	$\tilde{\eta}$	$\eta$
3	1,37	7,57	0,071	0,12	0,074	77,00	8,90	0,099	0,157	0,075	24,8
4	1,40	9,63	0,071	0,116	0,075	83,22	10,48	0,110	0,195	0,104	29,7
7	1,74	7,41	0,070	0,128	0,074	51,81	11,22	0,113	0,199	0,115	42,3
9	1,02	5,64	0,070	0,110	0,080	67,57	7,37	0,081	0,213	0,118	47,1

Встановлено, що зведений індекс показника технічного рівня ЛГН з удосконаленими робочими органами (тип-II та тип-III) коливається у діапазоні від 0,94 до 0,97 залежно від умов експлуатації і відповідає вищій категорії якості. Конкурентоспроможність ЛГН типу-II становить 1,06 ... 1,07, ЛГН типу-III – 1,09, тобто за показниками технічного рівня вони перевищують аналог, ЛГН типу-I.

Використання ЛГН типу-II при роботі на РР з 20 %-м газовмістом є більш ефективним, оскільки показник його технічного рівня зростає на 7,2 %. Причому показник уніфікації удосконалених ЛГН типу-II і типу-III однаковий з ЛГН типу-I.

## ВИСНОВКИ

У дисертації вирішено науково-практичну задачу – підвищення вихідних характеристик лабіринтно-гвинтового насоса шляхом розробки теорії робочого

процесу на базі узагальненої фізичної моделі, створення методики проектування, яка базується на багатокритеріальній оптимізації параметрів, що є підґрунтям для підвищення технічного рівня та удосконалення конструкції ЛГН. Основні наукові та практичні результати і висновки роботи полягають у наступному:

1. На базі узагальненої фізичної моделі течії РР в проточній частині ЛГН розроблено теорію його розрахунку та проектування, що дозволяє виконувати розрахунки без емпіричних коефіцієнтів та визначати його раціональні конструктивні і робочі параметри.

2. Розроблено тривимірну математичну модель течії РР в проточній частині ЛГН. За результатами математичного моделювання отримано лінії течії в проточній частині та розподіл тиску по довжині у різні проміжки часу, що дозволяє обґрунтовано проводити вибір геометрії проточної порожнини та конструктивних параметрів робочих органів.

3. Теоретично-експериментальним шляхом встановлено такі особливості робочого процесу ЛГН:

- значення критичного числа Рейнольдса становить 630;
- максимальне значення коефіцієнта нерівномірності подачі ЛГН на порядок менше ніж у гвинтових насосах та становить  $3,897 \cdot 10^{-4}$ ;
- за критерієм кавітації ЛГН відносяться до насосів зі звичайним рівнем кавітації, проте при збільшенні газовмісту РР, що перекачується, в них з'являються властивості, характерні для насосів, які кавітують;
- удосконалення конструкції робочих органів ЛГН дозволяє підвищити його вихідні характеристики при роботі на газорідних сумішах на 7 % та технічний рівень на 9 %.

Врахування зазначених особливостей дозволяє узгодити параметри ланок ЛГН при роботі у складі насосного ГА.

4. Отримано аналітичні залежності для визначення запасу герметичності торцевого ущільнення ЛГН. Встановлено, що для реальних умов роботи ЛГН торцеве ущільнення зберігає герметичність по тиску, що в 2,5 ... 3 рази перевищує максимальний робочий тиск насоса. Отримані результати можуть бути використані для встановлення герметичності торцевих ущільнень інших гідравлічних пристроїв.

5. Теоретично-експериментальним шляхом встановлено, що визначальним параметром при прогнозуванні надійності ЛГН є зношення виступів нарізок втулки та гвинта його робочих органів, граничне значення ймовірності безвідмовної роботи ЛГН за 10 000 годин становить 0,984, а час безвідмовної роботи –  $1,46 \cdot 10^6$  годин, і він відноситься до пристроїв з високим рівнем надійності. Отримані показники надійності дозволяють обґрунтовано визначати час технічного обслуговування і ремонту ЛГН.

6. Розроблено дві нові конструкції робочих органів ЛГН – ЛГН типу-II, ЛГН типу-III, захищені патентами України. Експериментальним шляхом доведено підвищення ККД на 5 % при використанні розроблених конструкцій в окремо працюючому ЛГН та на 30 % зростання ККД і майже вдвічі напору при роботі ЛГН в якості вхідної ланки багатоступеневого відцентрового насосного ГА.

7. Експериментальним шляхом встановлено вплив газовмісту РР на вихідні характеристики і пульсації тиску на виході ЛГН. Отримані аналітичні залежності



дозволяють обґрунтувати сферу ефективного використання ЛГН при роботі на газорідинній суміші. Адекватність розробленої теорії підтверджена за критерієм Фішера (з ймовірністю 0,95 можна стверджувати, що середня квадратична похибка при вимірюваннях становила: тиску – 1,5 %, пульсацій тиску – 2,5 %, витрати рідини – 1,5 %, витрати повітря – 0,9 %).

8. Розроблено комплекс програм і методику проектування ЛГН на основі багатокритеріальної оптимізації параметрів, яка дозволяє пришвидшити створення і впровадження нових та модернізованих робочих органів ЛГН, забезпечити їх ефективне використання у широкому діапазоні зміни газовмісту РР.

Доведено економічну ефективність від впровадження у виробництво і промисловість розробленого ЛГН. Встановлено склад економічних збитків при експлуатації ЛГН при видобутку нафти. Найбільш питому вагу у збитках складають втрати на додаткові капіталовкладення, більш ніж 46 %. Це дозволяє в подальшому розрахувати та оптимізувати збитки при виробництві та експлуатації ЛГН.

9. Розроблені наукові положення та отримані результати дозволяють на етапі проектування оцінити ефективність використання ЛГН з будь-якими конструктивними і робочими параметрами; оптимізувати конструктивні і робочі параметри ЛГН за великою кількістю критеріїв для їх ефективної роботи при зміні параметрів РР у широкому діапазоні.

Результати дисертаційного дослідження впроваджено у проектно-конструкторські роботи ПАТ «ХЕМЗ–ІРЕС», ТОВ «Промгідропривод», ТОВ «Харківгазобладнання» та навчальний процес кафедр гідропневмоавтоматики і гідроприводу НТУ «ХП» та прикладної гідроаеромеханіки СумДУ.

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Лебедев А.Ю. Интегральная методика розрахунку витратної характеристики лабіринтно-гвинтового насоса / А.Ю. Лебедев, П.М. Андренко. – Вісник СумДУ. Серія «Технічні науки». – 2011. – № 4. – С. 20–25. *Здобувачем проведено уточнення фізичної моделі робочого процесу ЛГН, доведено правомірність використання розробленої методики розрахунку.*

2. Лебедев А.Ю. Вплив газовмісту рідини на характеристики лабіринтно-гвинтового насоса / І.І. Білокінь, Ю.М. Стеценко, В.А. Макагон, П.М. Андренко, А.Ю. Лебедев // Східно-Європейський журнал передових технологій. – 2011. – № 2/8 (50). – С. 32–35. *Здобувач взяв участь у проведенні експериментальних досліджень та аналізі їх результатів, формулюванні висновків.*

3. Лебедев А.Ю. Математическая модель стенда для испытаний насосов / П.М. Андренко, А.Ю. Лебедев / MOTROL: Commission of motorization and energetics in agriculture: Polish Academy of sciences. – Lublin, 2011. – Vol. 13C. – P. 200–210. *Здобувач брав участь у розробці математичної моделі експериментального стенда.*

4. Лебедев А.Ю. Прогнозування надійності лабіринтно-гвинтового насоса / А.Ю. Лебедев // Механіка та машинобудування. – Харків, 2012. – № 1. – С. 24–32.

5. Лебедев А.Ю. Визначення нерівномірності подачі лабіринтно-гвинтового насоса / А.Ю. Лебедев, П.М. Андренко // Промислова гідравліка і пневматика. – Вінниця: ВДАУ, 2012. – № 3 (37). – С. 33 – 37. *Здобувач брав участь у*

*розробці методики визначення нерівномірності і миттєвої подачі лабіринтно-гвинтових насосів.*

6. Лебедев А.Ю. Визначення коефіцієнта втрат на тертя для розрахунку характеристик лабіринтно-гвинтового насоса / А.Ю. Лебедев // Праці Таврійського державного агротехнологічного університету. – Мелітополь: ТДАУ, 2012. – Вип. 12, Т. 3. – С. 215–219.

7. Лебедев А.Ю. Визначення критерія кавітації лабіринтно-гвинтового насоса / А.Ю. Лебедев // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». – Харків: НТУ «ХПІ». – 2013. – № 5.(979). – С. 124–129.

8. Лебедев А.Ю. Експериментальні дослідження лабіринтно-гвинтового насоса / П.М. Андренко, А.Ю. Лебедев, І.І. Білокінь, Ю.М., Стеценко Ю.М., В.А. Макагон, В.Ф. Кошевий // Промислова гідравліка і пневматика. – Вінниця : ВДАУ, 2013. – № 2 (40). – С. 21–30. *Здобувач брав участь в експериментальних дослідженнях, їх аналізі і формулюванні висновків.*

9. Лебедев А.Ю. Математичне моделювання течії робочої рідини в лабіринтно-гвинтовому насосі / А.Ю. Лебедев, Я.І. Мальцев // Праці Таврійського державного агротехнологічного університету. – Мелітополь : ТДАУ, 2013. – Вип. 13, Т. 6. – С. 196–203. *Здобувачем проведено розрахунок ліній течії РР в ЛГН, аналіз результатів досліджень.*

10. Лебедев А. Ю. Експериментальні дослідження занурювального насосного агрегату з лабіринтно-гвинтовими ступенями / А.Ю. Лебедев // Промислова гідравліка і пневматика. – Вінниця, 2013. – № 2 (44). – С. 23–26.

11. Лебедев А.Ю. Усовершенствование конструкции лабиринтно-винтового насоса / А.Ю. Лебедев // Молодежный научно-технический вестник «МГТУ им. Баумана» [Электронный ресурс], 6 июня 2013 г. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2013 / Режим доступа: <http://sntbul.bmstu.ru/doc/585813.html>

12. Lebedev A. Labyrinth screw pump theory / P. Andrenko, A. Lebedev // MOTROL: Commission of motorization and energetics in agriculture: Polish Academy of sciences. – Lublin – Rzeszow. – 2014. – Vol. 16, No 6. – P. 35–42. *Здобувачем запропоновано безрозмірні критерії для оцінки характеристик ЛГН.*

13. Лебедев А.Ю. Підвищення технічного рівня лабіринтно-гвинтового насоса за рахунок вдосконалення його робочих органів / А.Ю. Лебедев // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». – Харків: НТУ «ХПІ». – 2014. – № 6 (1049). – С. 111–117.

14. Лебедев А.Ю. Багатокритеріальна оптимізація параметрів лабіринтно-гвинтового насоса / П.М. Андренко, О.В. Дмитрієнко, А.Ю. Лебедев // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». – Харків: НТУ «ХПІ». – 2015. – № 6 (1115). – С. 3–12. *Здобувачем проведено аналіз впливу газовмісту РР та форми робочих органів ЛГН на його характеристики, оптимізацію параметрів, аналіз отриманих результатів.*

15. Патент на корисну модель 68863 Україна F04/00. / Лабіринтно-гвинтовий насос / Андренко П.М., Стеценко Ю.М., Білокінь І.І., Лебедев А.Ю., Макагон В.А.; // заявник і патентовласник Андренко П.М., Стеценко Ю.М., Білокінь І.І., Лебедев А.Ю., Макагон В.А. – № 201112505; заявл. 25.10.2011; опубл. 10.04.2012, Бюл. № 7. *Здобувачем запропоновано елементи удосконаленої*

*конструкції ЛГН.*

16. Патент на корисну модель 73119 Україна F04D 3/00. / Лабіринтно-гвинтовий насос / Андренко П.М., Стеценко Ю.М., Білокінь І.І., Лебедев А.Ю., Макагон В.А. // заявник і патентовласник Андренко П.М., Стеценко Ю.М., Білокінь І.І., Лебедев А.Ю., Макагон В.А. – № 201202788; заявл. 12.03.2012; опубл. 10.09.2012, Бюл. № 17. *Здобувач брав участь у розробці удосконаленої конструкції ЛГН, оцінці ефективності її впровадження.*

17. Лебедев А.Ю. Експериментальний стенд для дослідження лабіринтно-гвинтових насосів / П.М. Андренко, А.Ю. Лебедев // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я : XIX міжнар. наук.-практ. конф., – 1–3 черв. 2011 р. : тези доп., Ч. 1. – Харків, 2011. – С. 85. *Здобувачем запропоновано принципову схему експериментального стенда.*

18. Лебедев А.Ю. Вплив газовмісту рідини на характеристики лабіринтно-гвинтового насоса / П.М. Анренко, А.Ю. Лебедев // XII міжнар. наук.-техн. конф. АС ПГП. 11–13 жовтня 2014 р. : матеріали конф. – Донецьк, 2011. – С. 83. *Здобувачем проведено аналіз характеристик лабіринтно-гвинтового насоса залежно від параметрів робочої рідини.*

19. Лебедев А.Ю. Алгоритм расчета расходной характеристики лабиринтно-винтового насоса / А.Ю. Лебедев // Гидромашины, гидроприводы и гидропневмоавтоматика: Междунар. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов, 5-7 декаб. 2011 г.: сборник докладов. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011. – С. 66–69.

20. Лебедев А.Ю. Надійність лабіринтно-винтових насосів / А.Ю. Лебедев // Промислова гідравліка і пневматика : XXIII Міжнар. наук.-техн. конф. 19–20 вер. 2011 р. Чернігів. : матеріали конф. – Вінниця: ГЛОБУС-ПРЕС, 2012. – С. 64.

21. Лебедев А.Ю. Вплив форми каналу лабіринтно-гвинтового насоса на його характеристики / А.Ю. Лебедев // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я : XX Міжнар. наук.-практ. конф., 15–17 трав. 2012 р. : тези доп., Ч. 1. – Харків, 2012. – С. 122.

22. Лебедев А.Ю. Вплив геометричних параметрів лабіринтно-гвинтового насоса на його характеристики / А.Ю. Лебедев // Сучасні технології в промисловому виробництві: матер. II всеукр міжвуз. наук.-техн. конф. – Суми, 2012. – С. 62–63.

23. Лебедев А.Ю. Методика визначення нерівномірності подачі лабіринтно-гвинтового насоса / А.Ю. Лебедев, П.М. Андренко // Гідроаеромеханіка в інженерній практиці: XVII Міжнародна наук.-техн. конф., 17–19 квіт. 2012 р. : матеріали конф. – Черкаси: АПБ ім. Героїв Чорнобиля, 2012. – С. 80. *Здобувачем проведено оцінку впливу геометрії насоса на нерівномірність його подачі.*

24. Лебедев А.Ю. Критерии для сравнения характеристик лабиринтно-винтовых насосов / П.Н. Андренко, А.Ю. Лебедев / Гідроаеромеханіка в інженерній практиці: XVIII Міжнар. наук.-техн. конф., 21–24 трав. 2013 р. : матеріали конф. – Київ, 2013. – С. 135. *Здобувачем проведено вибір критеріїв для порівняння характеристик ЛГН.*

25. Лебедев А.Ю. Аналітичний аналіз експериментальних досліджень лабіринтно-гвинтового насоса / А.Ю. Лебедев // Промислова гідравліка і пневматика: XV Міжнар. наук.-техн. конф. АС ПГП. 17–19 верес. 2014 р. : матеріали

конф. – Мелітополь, 2014. – С. 81.

26. Лебедев А.Ю. Багатокритеріальна оптимізація конструктивних параметрів лабіринтно-гвинтового насоса / П.М. Андренко, О.В. Дмитрієнко, А.Ю. Лебедев // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: тези доп. XXIII Міжнар. наук.-практ. конф., Ч I, 20–22 трав. 2015 р., – Харків: НТУ «ХПІ», 2015 – С. 241. *Здобувачем проведено аналіз впливу газовмісту робочої рідини та форми робочих органів лабіринтно-гвинтового насоса на його характеристики, оптимізацію параметрів, аналіз отриманих результатів.*

27. Лебедев А. Ю. Методологія розрахунку і проектування лабіринтно-гвинтових насосів / А.Ю. Лебедев // Промислова гідравліка і пневматика: XVI Міжнар. наук.-техн. конф. АС ПГП. 15–17 жовт. 2015 р. : матеріали конф. – Суми, 2015. – С. 71–73.

## АНОТАЦІЇ

**Лебедев А.Ю. Підвищення вихідних характеристик лабіринтно-гвинтових насосів шляхом визначення їх раціональних параметрів.** 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, 2016.

У дисертаційній роботі визначено, науково обґрунтовано і вирішено задачу підвищення вихідних характеристик лабіринтно-гвинтових насосів за рахунок розробки теорії його робочого процесу. Уточнено фізичну модель його робочого процесу і на цій основі розроблено методикау їх розрахунку та проектування, що включає багатокритеріальну оптимізацію параметрів і не містить емпіричних коефіцієнтів. Вперше розроблено тривимірну математичну модель течії робочої рідини в проточній частині лабіринтно-гвинтового насоса та отримано лінії течії і розподілу тиску по його довжині. Введено безрозмірні критерії для оцінки робочих характеристик даного насоса. Розроблено дві удосконалені конструкції проточних частин робочих органів лабіринтно-гвинтового насоса, які дозволяють підвищити його робочі характеристики та технічний рівень. Виявлено закономірності та особливості робочих процесів, що відбуваються в лабіринтно-гвинтовому насосі, і проведено його експериментальні дослідження. Теоретичним та експериментальним шляхом встановлено миттєву подачу і пульсації тиску на його виході та визначено граничну межу газовмісту робочої рідини, при якій забезпечується режим без кавітаційної роботи. Вперше отримано аналітичні залежності для визначення запасу герметичності торцевого ущільнення насоса. Встановлено показники його надійності. Для різних конструкцій робочих органів насоса отримано нові математичні залежності, що характеризують вплив конструктивних параметрів на його характеристики. Результати роботи впроваджено у ряді спеціалізованих підприємств України і використовуються у навчальному процесі.

*Ключові слова:* гідроагрегат, лабіринтно-гвинтовий насос, робочий процес, робочі характеристики, робоча рідина, газовміст, оптимізація.

**Лебедев А.Ю. Повышение выходных характеристик лабиринтно-винтовых насосов путем определения их рациональных параметров.** На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.05.17 – гидравлические машины и гидропневмоагрегаты. – Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», Харьков, 2016.

В диссертационной работе установлена, научно обоснована и решена задача повышения выходных характеристик лабиринтно-винтовых насосов за счет разработки теории его рабочего процесса. Уточнена физическая модель рабочего процесса таких насосов в части особенностей течения рабочей жидкости через винтовые канавки и на этой основе разработана методика их расчета и проектирования, которая включает многокритериальную оптимизацию параметров и не содержит эмпирических коэффициентов. Впервые разработана трехмерная математическая модель течения рабочей жидкости в проточной части лабиринтно-винтового насоса и получены линии течения и распределение давления по его длине. Введены безразмерные параметры для оценки рабочих характеристик лабиринтно-винтовых насосов, позволяющие на этапе проектирования выбирать его оптимальные геометрические и конструктивные параметры. Разработан комплекс алгоритмов и программ для расчета и оптимизации конструктивных параметров лабиринтно-винтовых насосов. Обоснована правомерность использования разработанной теории лабиринтно-винтового насоса для расчета его характеристик. Предложены две усовершенствованные конструкции проточных частей рабочих органов лабиринтно-винтового насоса, позволяющие повысить его рабочие характеристики при работе на жидкостях с разным газосодержанием и при работе в качестве входной ступени центробежного насосного агрегата.

Получены аналитические зависимости для расчета мгновенной подачи и коэффициента неравномерности подачи лабиринтно-винтовых насосов. Теоретическим и экспериментальным путем установлены значения пульсаций давления на выходе из насоса. Установлено, что с увеличением газосодержания рабочей жидкости пульсации давления на выходе уменьшаются. На базе экспериментальных исследований таких насосов получена функция отклика, позволяющая определить рациональные параметры работы лабиринтно-винтовых насосов. Экспериментально получены максимальные значения газосодержания рабочей жидкости, при которой не происходит срыва подачи лабиринтно-винтового насоса и обеспечивается безкавитационный режим его работы. Доказано, что определяющим параметром надежности таких насосов является износ выступов нарезок втулки и винта. Значение вероятности безотказной работы лабиринтно-винтового насоса за 10 000 часов непрерывной работы составляет 0,984, а время безотказной работы –  $1,46 \cdot 10^6$ , т. е. доказана высокая надежность таких насосов. Установлен технический уровень лабиринтно-винтовых насосов с разными рабочими органами. Выполнена сравнительная оценка показателей технического уровня лабиринтно-винтовых насосов с разными рабочими органами. Теоретическим и экспериментальным путем доказана эффективность использования разработанных рабочих органов. Доказано, что использование

усовершенствованных конструкций рабочих органов насоса позволяет повысить его технический уровень на 9%. Обоснована экономическая эффективность от использования усовершенствованных рабочих органов. Результаты работы внедрены на ряде специализированных предприятий Украины и используются в учебном процессе.

*Ключевые слова:* гидроагрегат, лабиринтно-винтовой насос, рабочий процесс, рабочие характеристики, рабочая жидкость, газосодержание, оптимизация.

**Lebedev A.Y. Increasing the output characteristics of the labyrinth-screw pumps by determining their rational parameters.** Manuscript copyright.

Thesis for degree of Candidate of Sciences in Technique for speciality 05.05.17 – hydraulic machines and hydropneumatic units. – National Technical University «Kharkiv Polytechnical Institute», Kharkiv, 2016.

This work deals with certain, scientifically grounded and decided task of increase of labyrinth-screw pumps output descriptions due to development of theory of his working process. The physical model of his working process is specified on this basis the developed method of their calculation and planning which includes multicriterion optimization of parameters and does not contain empiric coefficients. In the first time the three-dimensional mathematical model of flow of working liquid is developed in running part labyrinth-screw pump and the got lines of flow and distributing of pressure on his length. Dimensionless criteria are entered for the estimation of workings descriptions of this pump. Two improved constructions of running parts of workings organs are developed labyrinth-screw pump, which allow to promote his workings descriptions and technical level. Found out conformities to law and features of workings processes which take place in to the labyrinth-screw pump and conducted it experimental researches. A theoretical and experimental way is set an instantaneous serve and pulsations of pressure on his output and the maximum limit of gas content of working fluid is certain at which the mode is provided without cavitation. In the first time analytical dependences are got for determination of supply of impermeability of butt-end compression of pump. Set his reliability indexes. For the different constructions of workings organs of pump new mathematical dependences which characterize influence of structural parameters on his descriptions are got. Job performances are inculcated in a number of the specialized enterprises of Ukraine and used in an educational process.

*Key words:* hydraulic aggregate, labyrinth-screw pump, work process, workings descriptions, working fluid, gas content, optimization.

