

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

ШУДРИК ОЛЕКСАНДР ЛЕОНІДОВИЧ



УДК 621.65.03, 532.5

**ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ ВІДЦЕНТРОВИХ
НАСОСІВ ЗА РАХУНОК ВДОСКОНАЛЕННЯ МАТЕМАТИЧНИХ
МОДЕЛЕЙ РОБОЧОГО ПРОЦЕСУ**

05.05.17 – гідравлічні машини та гідропневмоагрегати

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Харків – 2018

Дисертацією є рукопис.

Роботу виконано на кафедрі «Гідравлічні машини» Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник кандидат технічних наук, доцент
Шевченко Наталія Григорівна,
Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»,
доцент кафедри «Гідравлічні машини».

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, доцент
Роговий Андрій Сергійович,
Харківський національний
автомобільно-дорожній університет
професор кафедри теоретичної механіки і
гідравліки;

кандидат технічних наук
Рябова Світлана Олександрівна,
ПАТ «Турбоатом» СКБ «Турбогідромаш»,
інженер-конструктор I категорії.

Захист відбудеться «17» травня 2018 р. о 14.30 на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.050.11 в Національному технічному університеті «Харківський політехнічний інститут» за адресою: 61002, Харків, вул. Кирпичова, 2.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» за адресою: 61002, Харків, вул. Кирпичова, 2.

Автореферат розісланий «13» квітня 2018 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради



Юдін Ю.О.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність роботи. В даний час, з метою зміцнення енергетичної незалежності держави, реалізується програма, спрямована на підвищення ефективності роботи енергоспоживаючого обладнання. Насосне обладнання різних технологічних галузей є значущим споживачем електроенергії в промисловості. Тому підвищення показників енергоефективності та енергоємності насосного обладнання є науково-практичної задачею розвитку галузі насособудування та його використання у народному господарстві.

Насоси гідродинамічного принципу дії відносяться до широко розповсюдженого технологічного устаткування міжгалузевого призначення. Їх перевагою є здатність перекачувати рідини за складом і властивостями текучі середовища з достатньо високим рівнем надійності в роботі.

Так, у нафтовидобувній промисловості досить значну роль відіграють установки відцентрових насосів середньої швидкохідності, які при середніх і великих відборах рідини (80 - 200 м³/доб та більше) є найбільш ефективним і менш трудомістким видом устаткування. В останні роки значно ускладнилися умови експлуатації заглибного насосного обладнання: збільшилася глибина установки насоса до 3000 м; розширився діапазон в'язкості пластової рідини до 100 мПа·с; збільшилися об'ємні частки води, газу в продукції.

Склад і властивості середовищ, що перекачуються, істотно впливають на робочу характеристику насосів, приводять до підвищення енергетичних витрат на підйом продукції, зриву подачі, зношування елементів насоса, вібраціям та іншим технічним проблемам.

Розробка нових і вдосконалення вже існуючих математичних моделей, що враховують особливості гідродинамічного робочого процесу насоса, чисельне моделювання потоку газорідинної продукції у відцентрових ступенях насосу, прогнозування характеристик заглибних відцентрових насосів у реальних умовах експлуатації, є актуальними завданнями, розв'язання яких дозволить підвищити надійність і ефективність роботи всієї насосної установки.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами і темами. Дисертаційну роботу виконано на кафедрі «Гідравлічні машини» Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» у рамках держбюджетної теми Міністерства науки та освіти України «Розробка теоретичних основ синтезу гідравлічних машин, у тому числі гідротурбін та інших об'єктів автоматизації» (ДР № 0115U000513), в якій здобувач є виконавцем окремих етапів.

Мета і задачі дослідження. Мета дослідження – підвищення ефективності роботи заглибних відцентрових насосів шляхом вдосконалення математичних моделей робочого процесу.

Для досягнення поставленої мети поставлені наступні задачі:

1. Проаналізувати і узагальнити сучасний стан моделювання робочого процесу в лопатевих гідромашинах, експериментальні дослідження роботи заглибних відцентрових насосів для реальних умов експлуатації.

2. Розробити тривимірну математичну модель робочого процесу ступені відцентрового насоса на основі врахування особливостей течії газорідинної суміші в проточній частині.

3. Провести чисельні дослідження робочого процесу ньютонівської, неньютонівської рідини і газорідинної суміші в ступені заглибного відцентрового насоса.

4. Проаналізувати і узагальнити чисельні та експериментальні дослідження, розробити нові та удосконалити існуючі функціональні залежності розрахунку робочих характеристик заглибних відцентрових насосів, які враховують одночасно структуру потоку, в'язкість і наявність вільного газу.

5. Проаналізувати і розробити способи підвищення ефективності роботи заглибних відцентрових насосів, оцінити вплив скосу вихідної кромки робочого колеса, форми проточної частини ступені, а також застосування «конічної збірки» ступенів, згідно зміни їх пропускної здатності, при перекачуванні рідини з підвищеним вмістом газу на робочі характеристики насоса з малогабаритними робочими органами.

6. Реалізувати розроблені та вдосконалені математичні моделі у вигляді пакету прикладних програм для підвищення ефективності проектних робіт з вибору оптимального режиму роботи насосної установки.

Об'єкт дослідження – гідродинамічні процеси в проточній частині заглибного багатоступінчастого електровідцентрового насоса.

Предмет дослідження – характеристики заглибного відцентрового насоса, які враховують одночасно структуру потоку, в'язкість і наявність вільного газу, шляхом вдосконалення математичної моделі робочого процесу.

Методи дослідження. При виконанні дисертаційної роботи використовувалися фундаментальні положення теорії механіки рідин і газів. Поставлені в роботі завдання вирішуються на основі методів обчислювальної гідродинаміки і експериментальних досліджень. Математичне моделювання гідродинамічних процесів в проточних частинах заглибних відцентрових насосів здійснювалося із застосуванням методів обчислювальної гідрогазодинаміки, які реалізовані в програмному комплексі *OpenFOAM*.

Наукова новизна полягає в наступному:

–вперше розроблена математична модель тривимірної течії неньютонівської рідини типу Гершеля-Балклі для водонафтової емульсії і газорідинної суміші в ступені відцентрового насоса, що дозволяє враховувати особливості конструкції малогабаритної ступені насоса, склад і властивості середовища, що перекачується;

–вдосконалено функціональні залежності для визначення ефективної в'язкості рідини, коефіцієнтів перерахунку напору і ККД заглибних насосів, що дозволяє підвищити точність прогнозування робочих характеристик на реальні умови експлуатації насоса;

–отримала подальший розвиток математична модель моделювання робочого процесу в системі «свердловина-насос», а саме підвищена точність

визначення параметрів газорідинної суміші на прийомі насоса. Математична модель реалізована в комп'ютерній програмі «*PVT-Well-Pump*»;

–запропоновано новий підхід до чисельної реалізації математичної моделі прогнозування робочих характеристик заглибних відцентрових насосів, що дозволяє враховувати зміну об'єму газової фази і гідродинамічних характеристик продукції уздовж багатоступінчастого насоса.

Практичне значення отриманих результатів для насособудування:

1. Результати чисельного моделювання тривимірної течії газорідинної суміші дозволили вдосконалити проточну частину ступені заглибного відцентрового насоса (патент України на корисну модель).

2. Отримані функціональні залежності розрахунку ефективної в'язкості газорідинної продукції, коефіцієнтів перерахунку напору і ККД дозволяють з достатньою точністю прогнозувати робочі характеристики заглибного відцентрового насоса середньої швидкохідності при перекачуванні газорідинної суміші та водонафтової емульсії.

3. Розроблено комп'ютерну програму «*PVT-Well-Pump*», яка дозволяє підвищити ефективність проектних робіт з вибору оптимального режиму роботи насосної установки з урахуванням складу і фізичних властивостей рідини для реальних умов експлуатації;

4. Результати роботи впровадженні в навчальному процесі кафедри «Гідравлічні машини» НТУ «ХП» при викладанні навчальних дисциплін «Основи теорії гідромашин», «Гідравлічні нагнітачі» для підготовки спеціалістів в рамках освітніх програм «Галузеве машинобудування» та «Прикладна механіка»; в ОП Корпорація «Гідроелекс» та ТОВ «ЛІКВО» при вдосконаленні та оптимізації насосного обладнання.

Особистий внесок здобувача. Всі положення дисертації, що виносяться на захист, отримані здобувачем особисто. Серед них: вдосконалення математичної моделі течії багатофазних рідин; дослідження роботи насоса при перекачуванні рідини з урахуванням її структури; виведення залежностей для перерахунку характеристик насосів; розробка нової проточної частини ступені насоса для перекачування рідини з підвищеним вмістом вільного газу; реалізація вдосконаленої моделі у вигляді пакета прикладних програм.

Апробація результатів дисертації.

Основні положення і результати досліджень за темою дисертації доповідались та обговорювались на Міжнародних науково-практичних конференціях: Магістрантів (Харків, 2015); Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я (Харків, 2015); «Гідроаеромеханіка в інженерній практиці» (Київ, 2015); «Бъдещите изследвания» (Софія, 2016); «Машини, обладнання і матеріали для нарощування вітчизняного видобутку та диверсифікації постачання нафти і газу» (Івано-Франківськ, 2016); «Удосконалювання енергоустановок методами математичного і фізичного моделювання» (Харків, 2017); «Промислова гідравліка і пневматика» (Вінниця, 2017).

Публікації. За темою дисертації опубліковано 20 наукових праць, серед них 9 статей у наукових фахових виданнях України та які входять до міжнародних наукометричних баз даних, 3 патента, 1 свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір, 7 – у матеріалах конференцій.

Структура й обсяг дисертації.

Дисертаційна робота складається з анотації двома мовами, вступу, п'яти розділів, списку використаних джерел та додатків. Загальний обсяг дисертації становить 184 сторінки, з них 77 рисунків за текстом, 12 таблиць за текстом, список зі 141 найменування використаних джерел на 17 сторінках, 5 додатків на 31 сторінці.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність та доцільність дисертації, сформульовано її мету і задачі, визначено об'єкт, предмет і методи дослідження, наукову новизну та практичну значущість роботи.

Перший розділ присвячено аналізу концепцій розвитку насособудування в Україні. Визначено, що одним з перспективних напрямків наукової роботи в даній галузі є математичне моделювання робочих процесів та технологій.

Показано переваги чисельного та математичного моделювання, особливості робочого процесу в каналах гідромашин з урахуванням реальних факторів їх експлуатації. Проаналізовано основні напрямки і підходи до моделювання течій ньютонівських, неньютонівських рідин та багатофазних газорідинних сумішей.

Встановлено, що такі показники як обводненість продукції, її в'язкість та наявність вільного газу погіршують не тільки напірну характеристику насоса, а й енергетичну, зміщуючи при цьому оптимум режиму роботи в область менших подач. Виявлено, що рідина змінює свої реологічні властивості в залежності від об'ємної долі води B . У діапазоні обводненості $B=0,4-0,8$ значно збільшується в'язкість рідини, реологічні характеристики відповідають неньтонівській рідині типу Гершеля-Балклі.

Встановлено, що для перерахунку характеристик відцентрових насосів існує багато методик, але вони комплексно не враховують зміни реологічних властивостей рідини та наявність газу.

Тому, на підставі проведеного аналізу, обрано напрямок дослідження та методи, які полягають в підвищенні ефективності відцентрових насосів за рахунок вдосконалення їх математичних моделей.

У **другому розділі** для проведення комплексних розрахунково-теоретичних досліджень робочого процесу насосів застосовувалися методи чисельного моделювання тривимірних течій. Метод чисельного моделювання в'язких просторових течій рідини в проточних частинах ступенів заглибних насосів, реалізований у програмному комплексі *OpenFOAM*, базується на чисельному інтегруванні рівнянь нерозривності та Нав'є-Стокса, осереднених

по Рейнольдсу. Моделювання турбулентних ефектів виконується за допомогою k - ϵ та SST моделей турбулентності. Попередні розрахунки показали, що для моделювання течій в проточних частинах заглибних насосів найдоцільніше використовувати k - ϵ модель турбулентності, котра дала похибку між розрахунковими та експериментальними даними не більше 6%. Чисельні дослідження виконувалися для проміжної ступені насосу з метою врахування впливу направляючого апарату на робоче колесо (рис. 1).

Для верифікації пакету *OpenFOAM* були виконані тестові розрахунки течії в каналі змінного перетину, течії у робочому колесі та ступені заглибного відцентрового насоса EBH5-80 для робочого діапазону в'язкості продукції від 1 мПа·с до 100 мПа·с. Крім кількісного зіставлення інтегральних характеристик варто відзначити підтвердження якісних ефектів, що виникають при роботі насоса на в'язких рідинах. До них відносяться: зменшення напору, ККД і зміщення діапазону оптимальних подач в сторону менших значень зі збільшенням в'язкості.

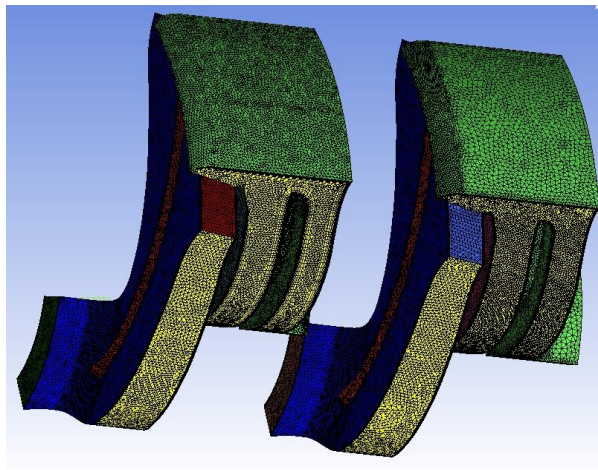


Рисунок 1 – Розрахункова сітка досліджуваної області проміжної ступені

Дослідження промислових реологічних характеристик водонафтової емульсії з вивчення особливостей формування міжфазних поверхонь емульсій показують підвищення їх в'язкості при різному вмісті води і дисперсності. Рідини з водовмістом $B=0,5 \div 0,75$ відносяться до неньютонівських типу Гершеля-Балклі:

$$\tau = \tau_0 + K \cdot \dot{\gamma}^n,$$

де τ_0 – межа текучості при швидкості зсуву; K – міра консистенції рідини; n – показник, що характеризує степінь відхилення неньютонівської рідини від ньютонівської. В табл. 1 наведені параметри промислових даних неньютонівської рідини типу Гершеля-Балклі.

Таблиця 1 – Параметри промислових даних неньютонівської рідини типу Гершеля-Балклі

B	1	20	30	45	60	70	77	83	95
K	10^{-3}	0,02	0,25	1,8	5	9	10	0,6	10^{-6}
n	1	1	0,75	0,53	0,5	0,48	0,45	0,7	1
τ_0	0	0	0	0	0	3	10	7	0

Виконана оцінка впливу моделі неньютонівської рідини типу Гершеля-Балклі на гідродинаміку в ступені заглибного відцентрового насоса. Аналіз результатів показує незначну зміну напору для в'язкості 20 мПа·с у всьому діапазоні подач. При збільшенні в'язкості до 50 мПа·с спостерігається зменшення напору на 10-15 % щодо значень напірної характеристики для

ньютонівської рідини. Значення ККД ступені збільшується при течії неньютонівської рідини: на 5-7 % при в'язкості 20 мПа·с і на 3-4 % при в'язкості 50 мПа·с у всьому діапазоні подач насоса.

В практичних розрахунках для неньютонівської рідини типу Гершеля-Балклі вводиться поняття узагальненої ньютонівської моделі, де тензор в'язких напружень визначається з урахуванням ефективної в'язкості $\tau = \mu_{\text{еф}} \dot{\gamma}$.

Узагальнена формула для визначення залежності ефективної в'язкості водонафтової емульсії залежить від величини характерної швидкості зсуву $\dot{\Gamma}$, в'язкості пластової води $\mu_{\text{в}}$, пластової нафти $\mu_{\text{н}}$, водовмісту B і значення точки інверсії $B_{\text{інв}}$

$$\mu_{\text{еф}} = \begin{cases} \mu_{\text{в}} \cdot 10^{K_{\text{в}}(1-B)} & \text{при } B > B_{\text{інв}}; \\ m^1 & \text{при } (B \leq B_{\text{інв}}) \text{ и } (B < 0,75); \\ m^{1,7} & \text{при } (B \leq B_{\text{інв}}) \text{ и } (B \geq 0,75), \end{cases}$$

$$\text{де } K_{\text{в}} = \begin{cases} e^{4,2 \cdot B_{\text{інв}}^{2,8}} + 1,6 & \text{при } B_{\text{інв}} > 0,3 \\ e^{2,2 \cdot B_{\text{інв}}^{3,8}} + 0,5 & \text{при } B_{\text{інв}} \leq 0,3 \end{cases}, \quad m = C^{\frac{1}{B_{\text{інв}}}} \cdot \mu_{\text{н}} \left(\frac{1 + 2,9B}{1 - B} \right), \quad C = \begin{cases} A, & \text{при } A > 1 \\ 1, & \text{при } A \leq 1 \end{cases},$$

$$A = \frac{(1 + 20 \cdot B^2)}{\dot{\Gamma}^{0,3B}}.$$

Для ступені заглибного відцентрового насоса значення характерної швидкості зсуву $\dot{\Gamma}$ обчислюється за формулою

$$\dot{\Gamma} = \frac{\sqrt{V_{m2}^2 + U_2^2}}{D_{\text{г}}} \quad \text{або} \quad \dot{\Gamma} = \frac{8U_2}{D_2},$$

де $D_{\text{г}}$ – гідравлічний діаметр межлопатевого каналу; D_2 – вихідний діаметр робочого колеса; V_{m2} , U_2 – меридіональна та окружна швидкості на виході з робочого колеса.

Для визначення характеристик насосу при роботі на реальній рідині необхідно отримати коефіцієнти перерахунку напору, витрати та ККД:

$$H_{\text{внє}}(Q, \nu) = H_{\text{в}}(Q) \cdot K_H \left(\frac{Q}{Q_{\text{опт}}}, \text{Re}(Q_{\text{опт}}, \nu) \right),$$

$$Q_{\text{внє}}(Q, \nu) = Q_{\text{в}}(Q) \cdot K_Q(\text{Re}(Q_{\text{опт}}, \nu)),$$

$$\eta_{\text{внє}}(Q, \nu) = \eta_{\text{в}}(Q) \cdot K_{\eta}(\text{Re}(Q_{\text{опт}}, \nu)).$$

де

$$\text{Re} = \frac{\sqrt[3]{Q_{\text{в}}^2 \cdot n}}{\mu_{\text{еф}}} \rho_{\text{грс}}.$$

Аналіз чисельних досліджень течії водонафтової емульсії з діапазоном в'язкості $\mu=1 \div 100$ мПа·с в ступенях насосів швидкохідності $n_s=80 \div 125$ дозволяє визначити функціональні залежності коефіцієнтів перерахунку подачі, напору та ККД:

$$K_H = 1 - a_0 \left(\frac{Q/Q_{\text{опт}}}{\text{Re}} \right)^{a_1},$$

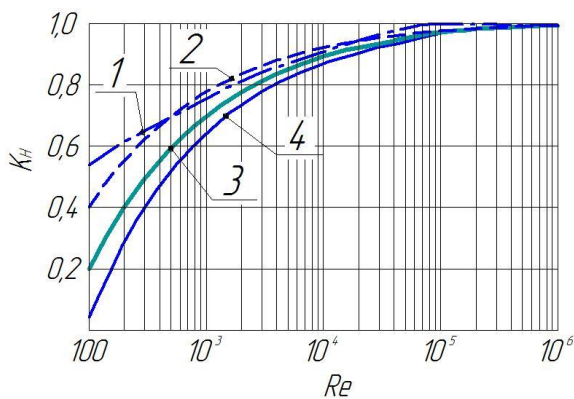
$$K_Q = \begin{cases} b_0 + b_1 \cdot \ln(\text{Re}) + b_2 \cdot (\ln(\text{Re}))^2 & \text{при } \text{Re} \leq 10^5 \\ 1 & \text{при } \text{Re} > 10^5 \end{cases},$$

$$K_\eta = \begin{cases} c_0 + c_1 \ln(\text{Re}) + c_2 (\ln(\text{Re}))^2 & \text{при } \text{Re} \leq 10^5 \\ 1 & \text{при } \text{Re} > 10^5 \end{cases}.$$

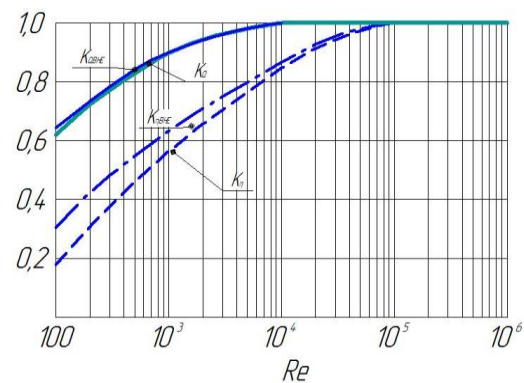
Коефіцієнти для визначення перерахункових залежностей представлені в табл. 2.

Таблиця 2 – Коефіцієнти для визначення перерахункових залежностей K_Q , K_H , K_η

a_0	a_1	b_0	b_1	b_2	c_0	c_1	c_2
5,6	0,42	-0,257	0,252	-0,013	-0,898	0,276	$-9,71 \cdot 10^3$



а)



б)

Рисунок 2 – Залежності перерахункових коефіцієнтів для напірної (а) та витратної й енергетичної (б) характеристик від функції числа Re з урахуванням режиму відкачування: 1 – ВНЕ (при $Q=Q_{\text{опт}}$); 2 – при $Q=0,5Q_{\text{опт}}$; 3 – при $Q=Q_{\text{опт}}$; 4 – при $Q=1,5Q_{\text{опт}}$

У **третьому розділі** розроблено математичну модель тривимірної течії газорідинної суміші в ступені відцентрового насоса, що дозволило враховувати особливості конструкції малогабаритної ступені і реальні умови експлуатації насосу, а також удосконалити проточну частину ступені.

Рівняння математичної моделі для моделювання тривимірної течії в'язкої газорідинної суміші в постановці Ейлера набувають наступного вигляду.

Рівняння нерозривності

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\beta \rho u_i)_{ph} = 0 \quad (1)$$

Об'ємні частки фаз β вважаються безперервними функціями простору і часу, а їх сума дорівнює одиниці.

RANS рівняння

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\beta \rho u_i u_j)_{ph} = -\beta \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\beta \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_l}{\partial x_l} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x_j} (-\rho \overline{u_i u_j})_{ph} \pm M_{ph} + F_{\omega}. \quad (2)$$

де u – середня швидкість; u' – швидкість турбулентності; ρ – густина; p – тиск (вважається загальним для обох фаз); M_k – передача міжфазного імпульсу на одиницю об'єму; μ – в'язкість; F_{ω} – дія відцентрових і коріолісових сил.

Дія міжфазних сил

$$\overline{M}_{ph} = C_{D\ l,g} \frac{3}{4} \rho_l \frac{\beta_g}{d_b} |\vec{u}_g - \vec{u}_l| (\vec{u}_g - \vec{u}_l).$$

Відповідно до цієї моделі, рівняння 1 та 2 записані для кожної фази і вирішуються спільно.

Для моделювання турбулентних ефектів при дослідженні тривимірної в'язкої газорідинної суміші використовувалася k - ϵ модель турбулентності. В даному випадку рівняння набувають наступного вигляду.

Рівняння кінетичної енергії турбулентності k

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\beta \rho u k)_{ph} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + \rho \beta (P_{ph}^* - \beta_1 \epsilon - \beta_2 k \omega)_{ph} + S_k^{int}$$

Рівняння швидкості дисипації ϵ

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\beta \rho u \epsilon)_{ph} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_{\epsilon}} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + \rho \beta \frac{\epsilon}{k} \left(C_{\epsilon 1} P_{ph} - C_{\epsilon 2} \epsilon + \frac{C_{\epsilon 3} P_{ph}^2}{\epsilon} \right)_{ph} + S_{\epsilon}^{int}$$

При моделюванні течій газорідинних сумішей необхідно враховувати особливості при розрахунках такого типу рідин в пакеті *OpenFOAM*: побудова структурованої розрахункової сітки, вибір вирішувача, визначення суцільного та дисперсного середовищ, задання об'ємних долей фаз.

На рис. 3 та рис. 4 показана візуалізація розрахунків ступені насоса, що дало змогу виявити взаємний вплив робочих органів при перекачуванні газорідинних сумішей (рис. 3, рис. 4).

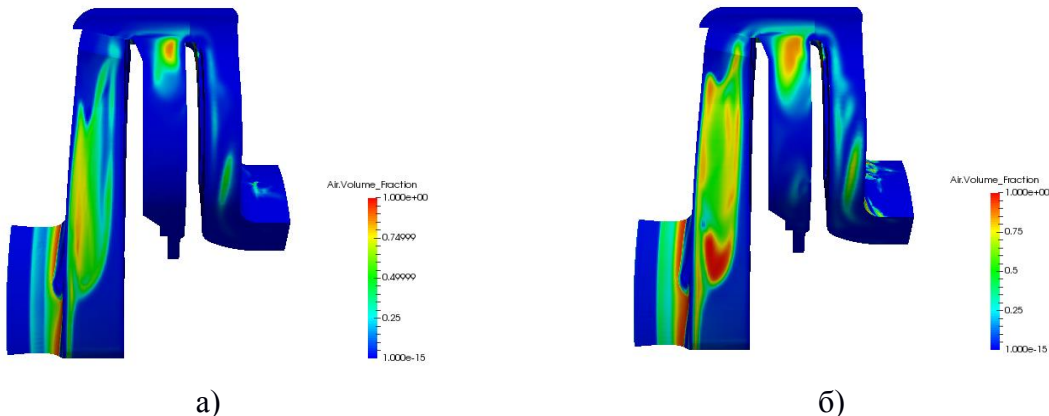


Рисунок 3 – Розподіл об'ємної частки газу в проточній частині (меридіональна проекція): а – $\beta_r=5\%$; б – $\beta_r=10\%$

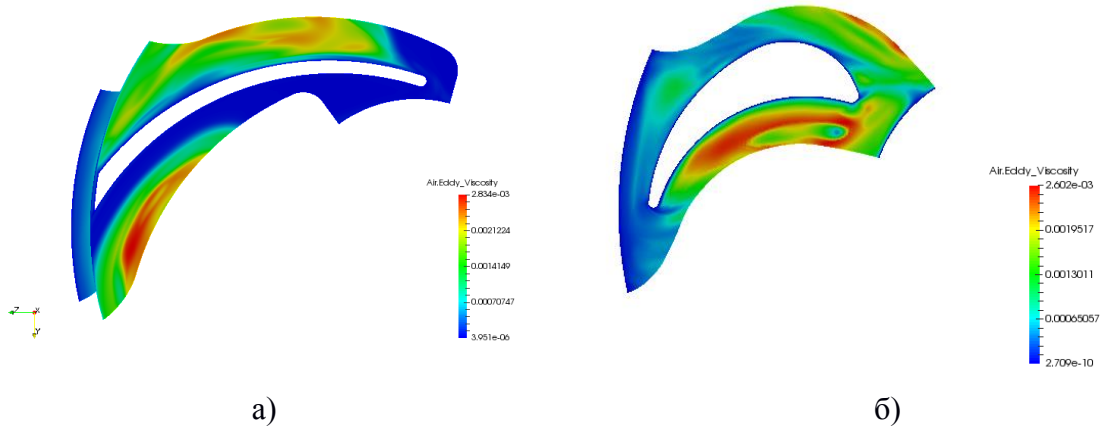


Рисунок 4 – Розподіл об'ємної частки газу в проточній частині робочого колеса (а) та направляючого апарату (б) ступені ЕВНД5-80

В результаті проведення чисельного експерименту були отримані напірні і енергетичні характеристики для моделі ступені ЕВН5-80, які досить якісно узгоджуються з опублікованими даними (рис. 5).

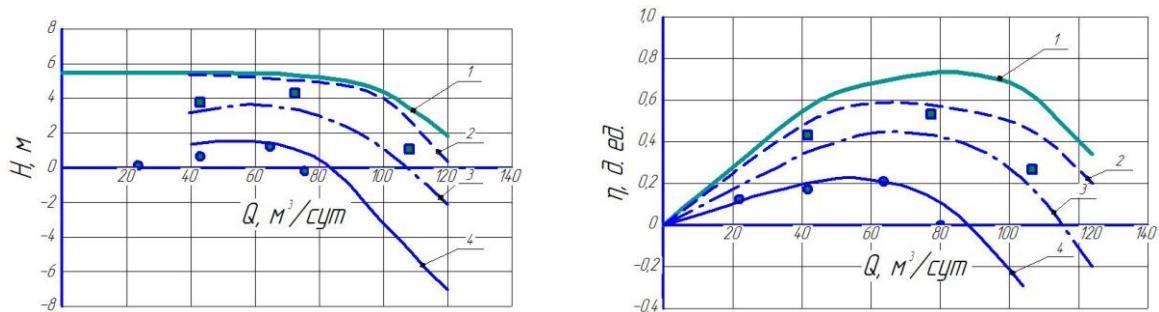


Рисунок 5 – Розрахункова напірна і енергетична характеристики ступені ЕЦВНД5-80 при газовмісті: 1 – 0 %; 2 – 5 %; 3 – 10 %; 4 – 20 %;
○, □ – розрахункові значення

Аналіз чисельних досліджень впливу вільного газу в продукції на роботу заглибного відцентрового насоса (швидкохідності $n_s=80-125$) показав, що в області значень газовмісту $(\beta_{Г})_{ВХ} \leq 0,3$ загальний характер зміни відносних параметрів характеристик насосів однаковий. Зміна коефіцієнтів K_H та K_η залежить від режиму роботи, що наведено на рис. 6.

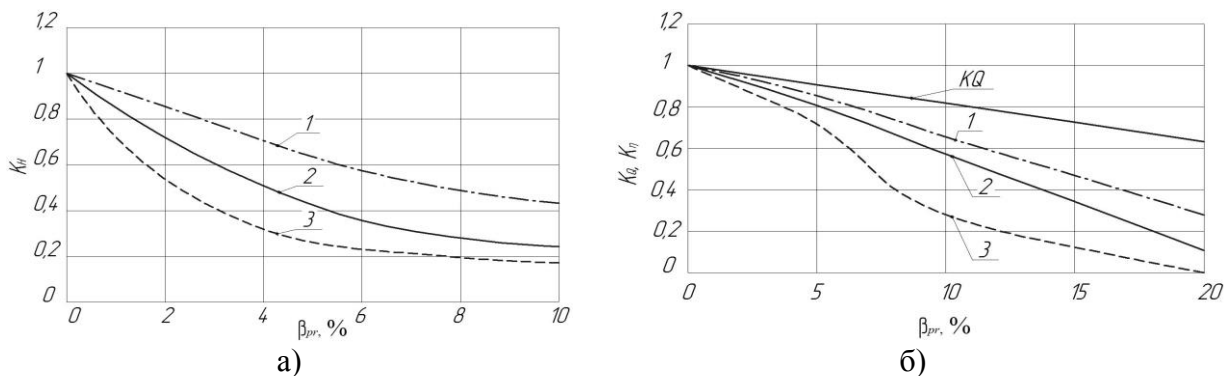


Рисунок 6 – Зміна коефіцієнтів напору (а) і витрати (б) в ступені від газовмісту:
1 – $0,75 Q_{opt}$; 2 – Q_{opt} ; 3 – $1,25 Q_{opt}$

Для розрахунку реальної характеристики заглибних відцентрових насосів при перекачуванні газорідинних сумішей, необхідно враховувати, що в міру збільшення тиску уздовж насоса (від ступені до ступені) зменшується вміст вільного газу в продукції за рахунок процесу розчинення газу. Запропоновано новий підхід до чисельної реалізації математичної моделі прогнозування робочих характеристик заглибних насосів за рахунок вдосконалення математичної моделі течії газорідинної суміші, що дозволяє враховувати зміну об'єму газової фази і гідродинамічних характеристик продукції, котра перекачується вздовж багатоступінчастого насоса.

На рис. 7 представлені результати розрахунку збільшення тиску від ступені до ступені з урахуванням зміни фізичних властивостей газорідинної суміші уздовж насоса.

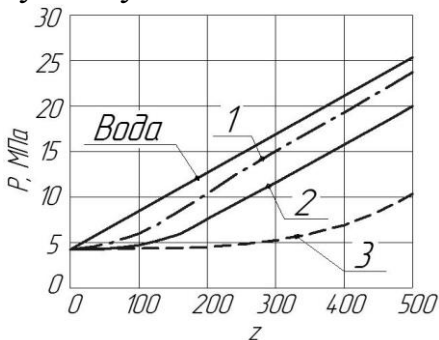


Рисунок 7 – Розподіл тиску уздовж насоса ЕВНД5-80 для води і для газорідинної суміші ($P_{вх}=4$ МПа):
1 – $0,75Q_{опт}$; 2 – $Q_{опт}$;
3 – $1,2Q_{опт}$

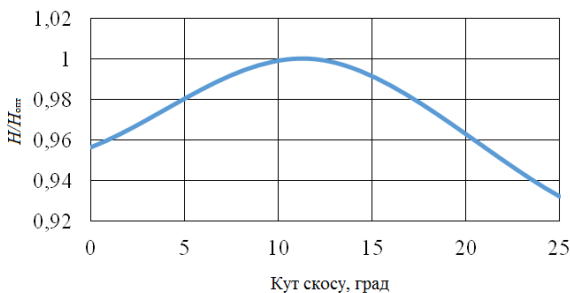


Рисунок 8 – Залежність відносної величини напору від кута скосу

Проведено чисельне дослідження впливу газомісту на вході у насос на його характеристики. При збільшенні тиску на вході в ступінь насоса, при перекачуванні газорідинних сумішей, спостерігається збільшення напору, що сприятливо позначається на енергоефективності насосної установки.

У **четвертому розділі** розглянуто шляхи підвищення ефективності заглибних насосів при перекачуванні газорідинної суміші, основні дослідження і напрямки щодо вдосконалення проточних частин ступенів заглибних насосів.

Для підвищення напористості ступені доцільно виконувати скіс вихідної кромки робочого колеса. Чисельні дослідження дозволили визначити раціональний кут скосу, який склав 10° - 12° . При цьому досягається максимально можливий напір без помітного зменшення ККД (рис. 8).

Чисельні дослідження течії в ступені насоса дозволили визначити втрати в нерухомих областях проточної частини.

Зроблено висновок, що втрати тиску в кільцевому каналі складають від 30% до 70% від загальних (табл. 3).

Таблиця 3 – Величини створюваного напору і втрати в нерухомих частинах ступені (базовий варіант)

Q , м ³ /доб	H , м	$H_{рк}$, м	$h_{кк}$, м	$h_{на}$, м	$h_{заг}$, м
60	4,784	6,93	0,618	1,528	2,146
80	4,547	6,154	0,441	1,166	1,607
100	4,056	5,453	1,01	0,387	1,397

Тому було запропоновано модифікувати проточну частину, виконавши робоче колесо з *S*-подібним меридіанним перетином (рис. 9). Дане технічне рішення захищено патентом України.

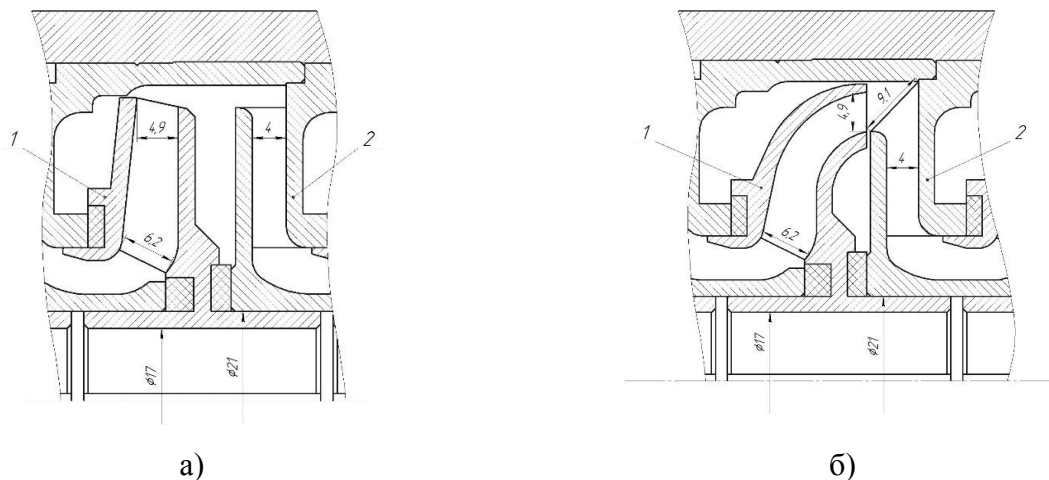


Рисунок 9 – Базова (а) і модифікована (б) ступені насоса ЕВНД5-80:
1 – Робоче колесо; 2 – Направляючий апарат

Таблиця 4 – Величини створюваного напору і втрати в нерухомих частинах ступені (модифікований варіант)

Q , м ³ /доб	H , м	$H_{рк}$, м	$h_{кк}$, м	$h_{на}$, м	$h_{заг}$, м
60	6,277	6,7	0	0,423	0,423
80	5,653	6,5	0	0,847	0,847
100	4,578	5,338	0	0,76	0,76

Аналіз результатів чисельного експерименту дозволив визначити втрати напору в проточній частині ступені. Таким чином, значення приведені в табл. 2 та табл. 4 показують відсутність гідравлічних втрат в кільцевому каналі та їх зменшення в направляючому апараті. Загальний напір ступені підвищився на 8-9% (табл. 4) при збереженні рівня ККД ступені базового варіанту (рис. 10).

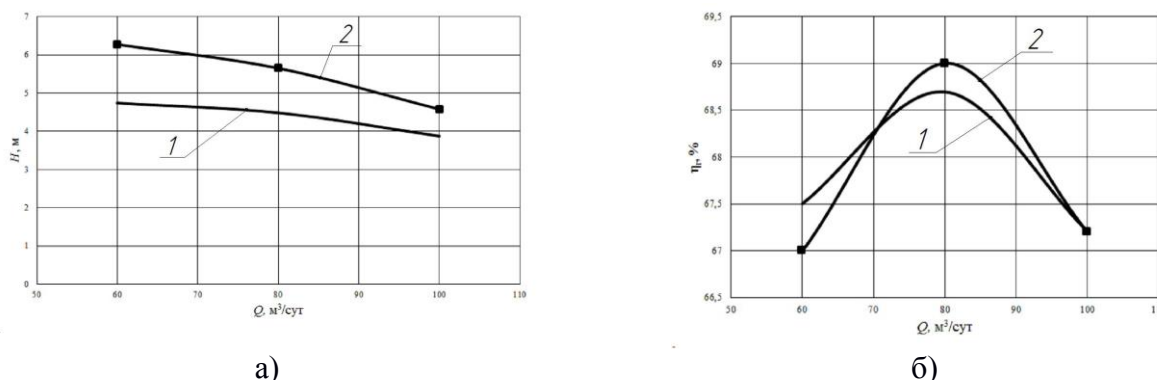


Рисунок 10 – Напірна (а) та енергетична (б) характеристики базової (1) та модифікованої (2) ступеней

Одним зі шляхів підвищення ефективності роботи заглибного відцентрового насоса – зняття покривного диска, котре проводиться з метою диспергації лопатками робочого колеса присутнього в продукції газу для створення дрібнодисперсної квазіоднорідної емульсії газ-вода-нафта.

У п'ятому розділі наведена вдосконалена математична модель роботи насоса у свердловині, що реалізована в програмному продукті «PVT-Well-Print». У програмі створено автономні модулі з графічним інтерфейсом. Розроблений пакет містить наступні модулі:

- Модуль «PVT» - моделювання характеристик водонафтогазової суміші при відповідних термодинамічних умовах.
- Модуль «Місце установки насоса» реалізує алгоритм побудови градієнта тиску та визначення місця установки насоса для заданого газовмісту.
- Модуль «Аналіз» дозволяє оцінити зміну градієнта тиску і необхідного напору насоса, параметрів рідини, місця установки, середньоінтегральної витрати та інших величин при дослідженні потенційних можливостей насоса.
- «Характеристика свердловини» користувач має можливість визначити точку спільної роботи свердловини і насоса з урахуванням робочого діапазону.
- Модуль «Енергоефективність» – визначення та порівняння енергоефективності установки заглибного відцентрового насоса для двох варіантів.

Аналіз розрахункових і промислових значень показав, що з достатньою точністю, за розробленим в дисертаційній роботі пакетом програм «PVT-Well-Print», можна прогнозувати параметри продукції, розподіл тиску.

Для оцінки ефективності «конічної збірки» ступенів, згідно зміни їх пропускної здатності, застосовано розроблений алгоритм розрахунку та побудовані характеристики насоса для трьох різних компоновок для забезпечення витрати $80 \text{ м}^3/\text{доб}$ при $\beta_r=10\%$ (рис. 11): варіант 1 – 554 ступенів ЕВН5-80; варіант 2 – 100 ступенів ЕВН5-100, 454 ступенів ЕВН5-80; варіант 3 – 50 ступенів ЕВН5-125, 100 ступенів ЕВН5-100, 404 ступенів ЕВН5-80.

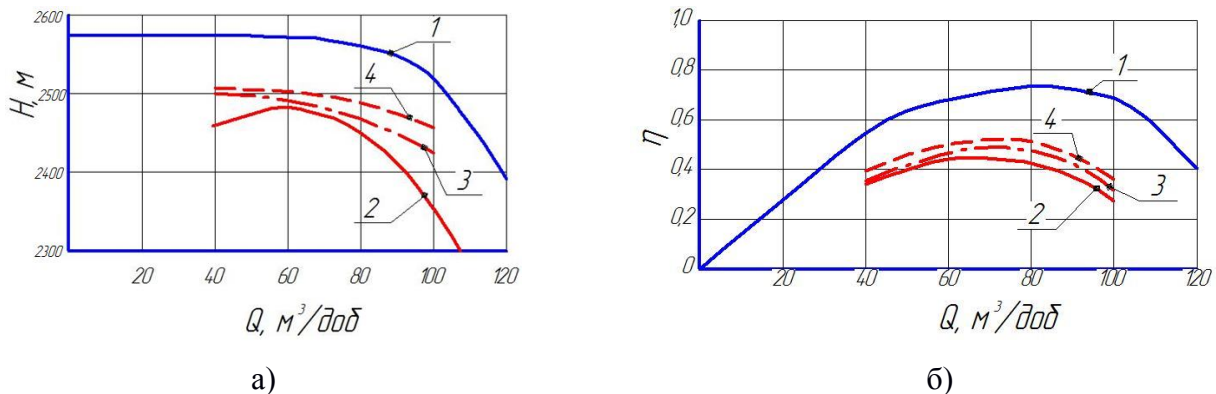


Рисунок 5.11 – Порівняння напірних (а) і енергетичних (б) характеристик:
1 – базова ступінь на воді; 2 – варіант 1; 3 – варіант 2; 4 – варіант 3

У додатках наведено акти впровадження деяких результатів роботи в ОП Корпорація «Гідроелекс» та ТОВ «ЛКВО», впровадження у навчальний процес на кафедрі «Гідравлічні машини» НТУ «ХП». Також наведено: результати перерахунку характеристик насосів ЕВН5-60, ЕВН5-80, ЕВН5-125 на рідину іншої в'язкості; математична модель розрахунку термо- та гідродинамічних параметрів газорідинної суміші; свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір на патенти; список публікацій.

ВИСНОВКИ

Дисертаційна робота присвячена актуальній науково-практичній задачі – підвищенню ефективності роботи заглибного електровідцентрового насоса у свердловині при його роботі на газорідинній суміші за рахунок вдосконалення математичних моделей робочого процесу. Основні результати і висновки по даній роботі наступні:

1. Проаналізовано сучасний стан моделювання робочого процесу в лопатевих гідромашинах, експериментальні дослідження роботи заглибних відцентрових насосів для реальних умов експлуатації при відкачуванні багатофазних сумішей, що дозволило обрати напрямок та методи дослідження.

2. Розроблено математичну модель тривимірної течії ньютонівської, неньютонівської рідини (типу Гершелі-Балклі для водонафтової емульсії) і газорідинної суміші в ступені відцентрового насоса, що дозволило враховувати особливості конструкції малогабаритної ступені і реальні умови експлуатації насоса (відносна похибка розрахункових і експериментальних даних для ньютонівських рідин і водонафтових емульсій з динамічною в'язкістю до 50 мПа·с склала не більше 6 %, а для газорідинної суміші з 10 % вмістом газу – до 10%), а також удосконалити проточну частину ступені. Підвищення напору запропонованої конструкції ступені при перекачуванні газорідинної суміші з підвищеним вмістом газової фази склало 9 % при збереженні монтажної висоти і значення ККД базової ступені (конструкція захищена патентом України).

Розроблено нові та удосконалено існуючі функціональні залежності для розрахунку робочих характеристик заглибних насосів, які дозволяють враховувати склад і властивості пластової продукції.

3. Розроблено способи підвищення енергоємності заглибних насосів, а саме: оцінено вплив скосу вихідної кромки робочого колеса, форма проточної частини ступені, а також застосування «конічної збірки» ступенів, згідно зміни їх пропускної здатності, для перекачування рідини з підвищеним вмістом газу на робочі характеристики відцентрового насоса з малогабаритними робочими органами.

4. Запропоновано новий підхід до чисельної реалізації математичної моделі прогнозування робочих характеристик заглибних насосів, який дозволяє враховувати зміну об'єму газової фази і гідродинамічних характеристик продукції, що перекачується вздовж багатоступінчастого насоса.

5. Отримала подальший розвиток математична модель робочого процесу системи «свердловина-насос», а саме: врахування процесу розгазування, зміни градієнта тиску, структури потоку, режиму течії і неоднорідності суміші, що дозволило збільшити точність визначення параметрів газорідної продукції на прийомі насоса. Проведена верифікація математичної моделі, яка показала достатню збіжність експериментальних і розрахункових даних – похибка не більше 8%.

6. Удосконалена математична модель моделювання роботи системи «свердловина-насос» і результати розрахунку течій мультифазних рідин в проточних частинах ЕВН реалізовані в програмному продукті «*PVT-Well-Prop*», що дозволило скоротити час при проектуванні та оптимізації установки заглибного електровідцентрового насосу.

7. Результати дисертаційного дослідження мають цінність при проектуванні і оптимізації насосного обладнання, що працює на багатофазних рідинах і впроваджені в ОП Корпорація «Гідроелекс», ТОВ «ЛІКВО», а також в навчальному процесі кафедри «Гідравлічні машини» НТУ «ХП».

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Shudryk A.L. Using open software application packages for simulation of viscous incompressible fluid / A. L. Shudryk // Вісник НТУ «ХП». Серія: Гідравлічні машини та гідроагрегати. – Х. : НТУ «ХП», 2016. – № 20 (1192). – С. 90–93.

2. Shudryk A.L. To the question of increasing the pilot performance of the stage of the submersible centrifugal pump at the production of oil and gas production / A. L. Shudryk, E.S. Koval, A.V. Doroshenko // Вісник НТУ «ХП». Серія: Гідравлічні машини та гідроагрегати. – Х. : НТУ «ХП», 2017. – № 42 (1264). – С. 51–55.

Здобувачем розглянуті та описані особливості підвищення напористості ступенів заглибних насосів при перекачуванні газорідних сумішей.

3. Шудрик О.Л. Комплекс программ для расчета параметров штанговой скважинной насосной установки / Н.Г. Шевченко, О.С. Коваль, О.Л. Шудрик // Вісник НТУ «ХП». Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. – Х.: НТУ «ХП», 2014. – № 1 (1044). – С. 175–179.

Здобувачем приведена математична модель течії газорідної суміші та визначення її гідродинамічних параметрів і структури.

4. Шудрик О.Л. Програмний модуль прогнозування гідродинамічних характеристик газорідної суміші свердловини при механізованому видобутку нафти / Н.Г. Шевченко, О.Л. Шудрик // Вісник НТУ «ХП». Серія: Математичне моделювання в техніці та технологіях. – Х. : НТУ «ХП». – 2014. – № 39 (1082). – С. 190–197.

Здобувачем програмно реалізований алгоритм по визначенню термо- і гідродинамічних параметрів багатофазних рідин.

5. Шудрик А.Л. Численное моделирование потока вязкой жидкости в ступени погружного насоса / Н.Г. Шевченко, О.Л. Шудрик // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Гідравлічні машини та гідроагрегати. – Х. : НТУ «ХПІ», 2015. – №3(1112). – С. 59–67.

Здобувачем побудована тривимірна модель проміжної ступені заглибного насосу, проведено чисельний експеримент, котрий порівнювався з паспортними характеристиками. Обґрунтовано вибір розрахункової області.

6. Шудрик А.Л. Особенности численного моделирования течения вязкой жидкости в каналах погружных лопастных насосов низкой и средней быстроходности / Н.Г. Шевченко, А.Л. Шудрик, Л.Р. Радченко // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Гідравлічні машини та гідроагрегати. – Х. : НТУ «ХПІ», 2015. – № 45 (1154). – С. 76–81.

Здобувачем проведено чисельний експеримент течії в'язкої рідини в ступені насосу. Обґрунтовано вибір моделі турбулентності та схеми розрахунку.

7. Шудрик А.Л. Исследование течения газожидкостной смеси в проточной части ступени погружного насоса для добычи нефти / Н.Г. Шевченко, А.Л. Шудрик, Е.Ю. Бондаренко // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Гідравлічні машини та гідроагрегати. – Х. : НТУ «ХПІ», 2017. – № 22 (1244). – С. 31–37.

Здобувачем наведено та візуалізовано результати розрахунку тривимірної в'язкої течії газорідинної суміші та отримано перерахункові коефіцієнти для визначення витратних і напірних характеристик насосу.

8. Шудрик А.Л. К расчету проточных частей высоконапорных радиально-осевых обратимых гидромашин / В. Э. Дранковский, М. Ю. Хавренко, А. Л. Шудрик // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Математичне моделювання в техніці та технологіях. – Х. : НТУ «ХПІ», 2016. – № 16. – С. 31–36.

Здобувач брав участь у створенні програмного забезпечення для проектування проточних частин гідромашин.

9. Шудрик А.Л. Особенности расчета характеристики погружного центробежного насоса с учетом изменения параметров газожидкостной смеси вдоль насоса / Н.Г. Шевченко, А.Л. Шудрик, Д.В. Бельмас // Промислова гідравліка і пневматика. – Вінниця : ВНАУ, 2017. – №3(57). – С. 45–48.

Здобувачем проведено аналіз зміни характеристик газорідинної суміші вздовж заглибного відцентрового насосу.

10. Патент на корисну модель 116113 Україна Е21В 33/12. / Пакер / Фик І.М., Римчук Д.В., Цибулько С.В., Шевченко Н.Г., Шудрик О.Л.; заявник і патентовласник НТУ «ХПІ». – № u201611438; заявл. 11.11.2016; опубл. 10.05.2017, Бюл. № 9.

Здобувач приймав участь у розробці пакера при експлуатації заглибного насосу.

11. Патент на корисну модель 117755 Україна F04D 1/06. / Ступінь заглибного насоса / Шевченко Н. Г., Дранковський В. Е., Шудрик О. Л., Резва К. С.; заявник і патентовласник НТУ «ХП». – № u201700051; заявл. 03.01.2017; опубл. 10.07.2017, Бюл. № 13.

Здобувачем розроблена проточна частина ступені заглибного насоса з метою зниження гідравлічних втрат для перекачування сумішей з підвищеним вмістом газу.

12. Патент на корисну модель 117761 Україна E21B 33/00 E21B 33/08. / Пакер / Фик І.М., Римчук Д.В., Цибулько С.В., Винник В.В., Шудрик О.Л.; заявник і патентовласник НТУ «ХП». – № u201700063; заявл. 03.01.2017; опубл. 10.07.2017, Бюл. № 13.

Здобувач приймав участь у розробці скребка при експлуатації заглибного насосу.

13. Комп'ютерна програма «Програма моделювання сумісної роботи заглибного відцентрового насоса (ЕВН) та свердловини при видобутку нафти» («PVT-Well-Pump») / Н.Г. Шевченко, О.Л. Шудрик // Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір №74077, Україна. Дата реєстрації в Державній службі інтелектуальної власності 09.10.2017.

Здобувачем створено пакет прикладних програм для визначення термота гідродинамічних характеристик рідини, що перекачується заглибним насосом, підбору насосної установки та перерахунку характеристик при роботі насоса на багатофазних рідина та оптимізації при проектуванні УЕВН.

14. Шудрик А.Л. Комплекс програм для прогнозування характеристик роботи УЕВН / Н.Г. Шевченко, О.Л. Шудрик, А.В. Мірзоян // Матеріали ІХ Міжнародної науково-практичної студентської конференції магістрантів. – Х. : НТУ «ХП». – 2015. – С. 105–106.

Здобувачем розроблено пакет прикладних програм для прогнозування та оптимізації установки заглибного відцентрового насосу.

15. Шудрик О.Л. Чисельне прогнозування інтегральних характеристик в ступені заглибного відцентрового насоса ЕВН5-80 / О.Л. Шудрик // ХХ Міжнародна науково-технічна конференція «Гідроаеромеханіка в інженерній практиці». – К. : НТУУ «КПІ», 2015. – С. 141–142.

16. Шудрик А.Л. К вопросу моделирования потока вязкой жидкости в ступени погружного центробежного насоса / Н.Г. Шевченко, О.Л. Шудрик // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: Тези доповідей ХХІІІ Міжнародної науково-практичної конференції «MicroCAD». – Т. 1. – Х. : НТУ «ХП», 2015. – С. 303.

Здобувачем встановлено особливості проведення чисельного експерименту в малорозмірних каналах заглибних відцентрових насосів.

17. Шудрик О.Л. Моделювання фізичних властивостей газорідинної суміші у свердловині / О.Л. Шудрик // ХІІ Міжнародна науково-технічна конференція «Бъдещите изследвания». – Софія: «Бял-ГРАД-БГ» ООД, 2016. – С. 26–29.

18. Шудрик О.Л. Дослідження впливу умов експлуатації заглибного електровідцентрового насоса на його робочі характеристики. / О.Л. Шудрик // Міжнародна науково-технічна конференція «Машини, обладнання і матеріали для нарощування вітчизняного видобутку та диверсифікації постачання нафти і газу» – Івано-Франківськ : ІФНТУНГ, 2016. – С. 25.

19. Шудрик А.Л. Моделирование мультифазных течений в погружных центробежных насосах при эксплуатации нефтяных скважин / А.Л. Шудрик, Н.Г. Шевченко // Міжнародна науково-технічна конференція «Удосконалення енергоустановок методами математичного і фізичного моделювання». – Х. : ІПМаш НАН України, 2017. – С. 40-41.

Здобувачем описано та вдосконалено алгоритм визначення параметрів газорідної суміші та їх вплив на напірну та енергетичну характеристику заглибного насосу.

20. Шудрик О.Л. Удосконалення методики визначення характеристики відцентрового насоса при добичі нафтогазової продукції / Н.Г. Шевченко, О.Л. Шудрик, Д.В. Бельмас // Матеріали конференції XVIII Міжнародної науково-технічної конференції АС ПГП «Промислова гідравліка і пневматика». Секція «Гідромашини і гідропневмоагрегати». – Вінниця : ВНТУ, 2017. – С. 56.

Здобувачем виведені залежності для перерахунку інтегральних характеристик з урахуванням зміни параметрів суміші вздовж насосу при його роботі на реальній рідині.

АНОТАЦІЇ

Шудрик О.Л. Підвищення ефективності використання відцентрових насосів за рахунок вдосконалення математичних моделей робочого процесу. 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, 2018 р.

Дисертацію присвячено вирішенню важливої науково-технічної задачі підвищення ефективності роботи заглибного електровідцентрового насоса при його роботі на реальній рідині, що представляє собою суміш в'язкої неньютонівської рідини, води та газу, за рахунок вдосконалення математичних моделей.

Виконано аналіз концепцій розвитку насособудування в Україні.

Описано методи математичного моделювання тривимірних течій в'язкої реальної рідини та їх переваги над фізичними експериментами. Обрано пакет програм для проведення чисельного експерименту в каналах заглибних насосів *OpenFOAM*. Для моделювання течії рідини в проточній частині насоса використовувалась система рівнянь нерозривності та Нав'є-Стокса. Для її замикання було обрано *k-ε* модель турбулентності.

Досліджено вплив реологічних властивостей неньютонівських рідин на характеристики відцентрового насоса. Наведено математичну модель турбулентної тривимірної течії неньютонівської рідини. Для розрахунків обрано модель неньютонівської рідини Гершеля-Балклі, що найбільш точно описує поведінку рідин даного типу. Вдосконалено залежності для перерахунку характеристик насосу при його роботі на реальній рідині.

Визначено та обрано підхід та математичну модель для моделювання тривимірної течії в'язкої газорідинної суміші та показані особливості при розрахунках такого типу рідин в пакеті *OpenFOAM*.

Розглянуто шляхи підвищення ефективності заглибних насосів шляхом зміни проточної частини. Визначено раціональний кут нахилу вихідної кромки. Запропоновано модифіковану ступінь насоса, котра захищена патентом України, для перекачування рідини з підвищеним вмістом газу.

Розглянуто та вдосконалено математичну модель сумісної роботи реальної свердловини та заглибного відцентрового насоса у вигляді пакета прикладних програм. Це дало змогу визначати основні фізичні характеристики рідини в залежності від термодинамічних умов.

Ключові слова: заглибний насос, робоче колесо, направляючий апарат, обчислювальна гідродинаміка, неньютонівська рідина, газорідинна суміш, напірність, модифікована ступінь, кінчна збірка, математична модель.

Шудрик А.Л. Повышение эффективности использования центробежных насосов за счет совершенствования математических моделей рабочего процесса. 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», 2018 г.

Диссертация посвящена решению важной научно-технической задачи повышения эффективности работы погружного электроцентробежного насоса при его работе на реальной жидкости, представляющей собой смесь вязкой неньютоновской жидкости, воды и газа, за счет совершенствования математических моделей.

Выполнен анализ концепций развития насосостроения в Украине.

Описаны методы математического моделирования трехмерных течений вязкой реальной жидкости и их преимущества над физическими экспериментами. Избран пакет программ для проведения численного эксперимента в каналах погружных насосов *OpenFOAM*. Для моделирования течения жидкости в проточной части насоса использовалась система уравнений неразрывности и Навье-Стокса. Для ее замыкания была выбрана $k-\varepsilon$ модель турбулентности.

Исследовано влияние реологических свойств неньютоновских жидкостей на характеристики центробежного насоса. Приведена математическая модель

турбулентной трехмерной течения неньютоновской жидкости. Для расчетов выбрана модель неньютоновской жидкости Гершеля-Балкли, наиболее точно описывает поведение жидкостей данного типа. Получена и проанализирована визуализация потока в проточной части степени насоса. Установлено, что при перекачке неньютоновских вязких жидкостей происходит уменьшение отрывных зон потока. Данный факт положительно влияет на напорные и энергетические характеристики насоса по сравнению с ньютоновских жидкостей той же вязкости.

Усовершенствованы зависимости для пересчета характеристик насоса при его работе на реальной жидкости.

Определен и избран подход и математическая модель для моделирования трехмерной течения вязкой газожидкостной смеси и показаны особенности при расчетах такого типа жидкостей в пакете *OpenFOAM*. С помощью пересчетных коэффициентов, полученных в результате численного эксперимента построены напорные и энергетические характеристики, сравнивались с экспериментальными данными. В результате расхождение сказала 3-5%.

Рассмотрены пути повышения эффективности погружных насосов путем изменения проточной части. Определен рациональный угол наклона исходной кромки. Предложена модифицированная ступень насоса, которая защищена патентом Украины, для перекачки жидкости с повышенным содержанием газа.

Исследованы основные принципы «конической» сборки насоса и представлены алгоритм для ее оптимальной компоновки.

Рассмотрены и усовершенствованы математическую модель совместной работы реальной скважины и погружного центробежного насоса в виде пакета прикладных программ. Это позволило определять основные физические характеристики жидкости в зависимости от термодинамических условий. Проведено верификацию расчетных и промысловых данных. Расхождение составило не более 8%.

Результаты исследования используются в учебном процессе кафедры «Гидравлические машины» НТУ «ХПИ»; в проектных работах ОП Корпорация «Гидроэлекс» и ООО «ЛИКВО» при совершенствовании и оптимизации насосного оборудования.

Ключевые слова: погружной насос, рабочее колесо, направляющий аппарат, вычислительная гидродинамика, неньютоновская жидкость, газожидкостная смесь, напористость, модифицированная ступень, коническая сборник, математическая модель.

Shudryk O.L. Increasing the efficiency of centrifugal pumps by improving the mathematical models of the working process. Manuscript.

Thesis for granting the Degree of Candidate of Technical sciences in speciality 05.05.16 – Hydraulic machines and hydropneumatic units. – National Technical University «Kharkiv Politechnic Institute», 2018.

The dissertation is devoted to the solution of an important scientific and technical problem of increasing the efficiency of a submersible electric centrifugal pump when it operates on a real liquid, which is a mixture of viscous non-Newtonian fluid, water and gas by improving mathematical models.

An analysis of the concepts of development of pumping plant in Ukraine is carried out.

The methods of mathematical modeling of three-dimensional flows of a viscous real liquid and their advantages over physical experiments are described. Selected software package for numerical experiment in *OpenFOAM* submersible pump channels. A system of indeterminate and Navier-Stokes equations was used to simulate the flow of fluid in the flow section of the pump. For its closure a k - ε turbulence model was chosen.

The influence of rheological properties of non-Newtonian fluids on the characteristics of a centrifugal pump is investigated. The mathematical model of the turbulent three-dimensional flow of the non-Newtonian fluid is given. For calculations, a model of the Herschel-Bulkley non-Newtonian fluid is chosen, which most accurately describes the behavior of liquids of this type. The dependencies for the recalculation of the characteristics of the pump during its operation on the real liquid have been improved.

The approach and mathematical model for modeling the three-dimensional flow of a viscous gas-liquid mixture are determined and chosen, and features are shown in the calculations of this type of fluid in the *OpenFOAM* package.

The ways of increasing the efficiency of submersible pumps by changing the flow part are considered. The rational angle of inclination of the initial edge is determined. The modified degree of the pump, protected by the Ukrainian patent, is offered for pumping a liquid with an increased gas content.

The mathematical model of a compatible operation of a real well and a submersible centrifugal pump in the form of a package of applied programs is considered and improved. This made it possible to determine the basic physical characteristics of the liquid, depending on the thermodynamic conditions.

Keywords: submersible pump, impeller, guide vane, computational fluid dynamics, non-Newtonian fluid, gas-liquid mixture, force, modified stage, conical assembly, mathematical model.



Підписано до друку 01.03.2018 р. Формат 60x84 1/16.
Папір офсетн. Друк – різнографічний. Умовн. друк. арк. 0,9
Гарнітура Times New Roman. Тираж 100 прим. Замовлення № 170518

Надруковано у копії-центрі «МОДЕЛІСТ»
(ФО-П Миронов М.В., Свідоцтво ВО 4 № 022953 від 24.04.2003 р.)
61002, м. Харків, вул. Мистецтв, 3
