

ІНФОРМАЦІЙНІ ПРОГРАМИ ТА КОМП'ЮТЕРНО- ІНТЕГРОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ

УДК 622.242.6

DOI: 10.31471/1993-9965-2023-1(54)-44-51

ДОСЛІДЖЕННЯ ГІДРОДИНАМІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК КЛАПАНА БУРОВОГО НАСОСА ДЛЯ РІЗНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ПРОМИВАЛЬНОЇ РІДИНИ

Т. П. Венгриянок, Р. О. Дейнега, О. Я. Фафлей, В. В. Михайлюк, О. В. Попов, А. І. Венгриянок

ІФНТУНГ; 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. +380666823641,
e-mail: venhreniuktetyana@gmail.com

З метою забезпечення технологічних процесів буріння нафтових і газових свердловин для створення тиску та подачі промивальної рідини використовують бурові насоси. Це обумовлює підвищені вимоги до їхніх характеристик, які, в свою чергу, суттєво впливають на дотримання режимів та забезпечення безперервності технологічного процесу спорудження свердловин. Найвідповідальнішою частиною бурового насоса є гідравлічна, оскільки її деталі піддаються дії високих тисків, агресивного середовища, абразивному зносу, кавітації тощо. Проведено аналіз умов роботи та руйнувань елементів клапанних вузлів бурових насосів. Особливу увагу приділено порівнянню гідродинамічних характеристик клапана бурового насоса для різних властивостей промивальної рідини. Для моделювання потоків рідини та проектування елементів клапана бурового насоса побудовано його тривимірну модель і застосовано імітаційне моделювання на основі методу скінченних елементів. Особливістю проведених досліджень є імітаційне моделювання гідродинамічних параметрів клапанів бурових насосів із врахуванням поведінки промивальної рідини за рахунок використання їх декількох різних моделей (бурового розчину та води). Застосовано параметричне моделювання зі змінним параметром – зазором між сідлом та тарілкою клапана. Контрольними параметрами у дослідженні задано значення величин тиску в точках, що розміщені в зазорі між сідлом та тарілкою клапана бурового насоса. За результатами імітаційного моделювання руху бурового розчину та води крізь щілину між сідлом та тарілкою клапана дозволило встановити величини гідравлічних опорів. Їх порівняння показує величину відхилення в середньому на 48,7 %.

Ключові слова: буровий розчин, тиск, гідравлічний опір, імітаційне моделювання.

To ensure the technological processes of drilling oil and gas wells, drilling pumps are used to create pressure and supply mud. This leads to increased requirements for their characteristics, which, in turn, have a significant impact on compliance with the regimes and ensuring the continuity of the technological process of well construction. The most critical part of a drilling pump is the hydraulic part, as its parts are exposed to high pressures, aggressive media, abrasive wear, cavitation, etc. The paper analyses the operating conditions and failures of the elements of drilling pump valves. Particular attention is paid to comparing the hydrodynamic characteristics of the drill pump valve for different properties of the flushing fluid. A three-dimensional model of the drill pump valve was built to simulate fluid flows and design the elements of the valve and a finite element simulation was applied. The peculiarity of the research is the simulation of the hydrodynamic parameters of drill pump valves, taking into account the behavior of the flushing fluid by using several different models (drilling mud and water). Parametric modeling with a variable parameter, the gap between the valve seat and the valve plate, is used. The control

parameters in the study are the values of pressure values at points located in the gap between the seat and the valve plate of the drilling pump. Based on the results, simulation modeling of the movement of drilling mud and water through the gap between the valve seat and the valve plate allowed us to determine the values of hydraulic resistances. Their comparison shows a deviation of 48.7% on average.

Key words: drilling fluid, pressure, hydraulic resistance, simulation modeling.

Вступ

Під час спорудження нафтових та газових свердловин для створення подачі бурового розчину застосовують бурові насоси. Основною частиною бурового насоса є гідравлічна, що містить корпус, вхідні та вихідні клапани, циліндро-поршневу групу тощо. Гідравлічна частина визначає ефективність, надійність і довговічність насоса загалом.

Останніми роками в Україні та за кордоном зростає тенденція до спорудження глибоких свердловин, що вимагає використання потужніших бурових насосів для забезпечення підвищених робочих тисків. Це обумовлює зростання навантаження на гідравлічну частину насоса, що негативно впливає на роботу клапанних вузлів. Клапани сучасних бурових насосів є самодіючими. Вони відкриваються та закриваються під дією перепаду тиску, власної ваги та зусилля пружини. Клапани є найвідповідальнішими і, як показує практика, найбільш швидкозношуваними вузлами у гідравлічній частині бурового насоса, тому від їх ресурсу залежить періодичність виконання технічного обслуговування насоса. Глибоке розуміння процесів, що відбуваються при роботі клапанів бурових насосів, має вирішальне значення під час їх конструювання та дослідження.

Аналіз закордонних та вітчизняних досліджень і публікацій

Особливості роботи клапанних вузлів поршневих насосів описанні багатьох роботах. Наприклад, у роботі [1]: розглянуто конструкції клапанних вузлів бурових насосів; проаналізовано основні конструкції, що використовуються в бурових насосах; обґрунтовано забезпечення підвищення довговічності та надійності деталей клапанних вузлів; запропоновано шляхи покращення конструкцій клапанних вузлів, враховуючи конкретні умови їх роботи і бурового насоса загалом.

У роботі [2] наведено дослідження роботи клапанів бурового насоса УНБТ-950, отриманих за результатами математичного моделювання з використанням різних величин коефіцієнтів витрати клапана. У цій же роботі визначено параметри роботи клапана, на які суттєво впливає коефіцієнт його витрати.

Авторами [3] описано причину, яка призводить до руйнування деталей клапана, а саме, потрапляння абразивних частинок із промивальної рідини в зазор між тарілкою та сідлом. Це пришвидшує руйнування спочатку манжети, а згодом і клапана. Щоб уникнути такого явища, запропоновано удосконалену конструкцію клапана, внутрішня поверхня ущільнювальної манжети якої є циліндричною. Манжета такої конструкції деформуватиметься у вертикальному напрямку, не утворюючи зазору з тарілкою клапана. Для підтвердження роботоздатності запропонованої конструкції манжети побудовано тримірну модель клапана та проведено імітаційне дослідження. За результатами цього дослідження підтверджено ефективність даної конструкції.

У роботі [4] досліджується явище кавітації в щілині клапанного вузла бурового насоса. У цій роботі за допомогою комп'ютерного моделювання визначено умови виникнення кавітації, а саме, показано, що її причиною є запізнення підйому і посадки клапанів. Підтверджено наявність зон кавітації – концентраторів зносу протічної частини клапана.

Робота [5] спрямована на розробку теоретичної моделі клапана бурового насоса для вивчення впливу швидкості потоку бурового розчину на його знос. Для аналізу розподілу швидкості бурового розчину у зазорі (щілині) між сідлом та тарілкою клапана використано метод скінченних елементів. Проведені дослідження показали, що у зоні максимальної швидкості бурового розчину відбувається знос на одних і тих же ділянках поверхонь деталей клапана.

Варто зауважити, що у більшості досліджень роботи клапанів бурових насосів, у якості робочої рідини застосовано воду. Проте, параметри бурового розчину значно відрізняються від параметрів води. Одними з таких відмінностей є його неньютонівська поведінка, густина, в'язкість, що у процесі імітаційного моделювання змінює гідродинамічні характеристики клапана бурового насоса. Тому у статті пропонується порівняння гідродинамічних характеристик клапана бурового насоса для різних властивостей промивальної рідини: води та бурового розчину.

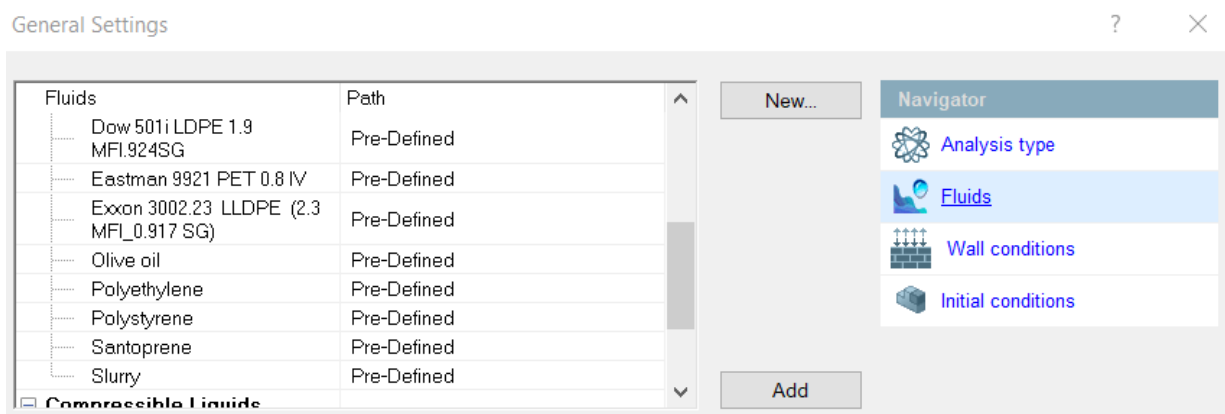


Рисунок 1 – Вибір середовища "Slurry"

Мета роботи

Мета роботи полягає у дослідженні гідродинамічних характеристик клапана бурового насоса для різних властивостей промивальної рідини (води та бурового розчину).

Для досягнення мети необхідно:

- побудувати тривимірну модель клапана бурового насоса;
- встановити гідродинамічні характеристики клапана бурового насоса при використанні у як рідини моделі води та бурового розчину;
- визначити відхилення результатів моделювання клапана при використанні як рідини моделі води та бурового розчину.

Викладення основного матеріалу

Варто зауважити, що в минулому конструкція клапанів бурових насосів здебільшого обґрунтовувалась на основі експериментальних випробувань та досвіду роботи. Проте такий підхід є дуже високовартісним і трудомістким. Для покращення процесу проектування насоса, можливість прогнозування продуктивності перед виготовленням прототипів має вирішальне значення. Але це викликає труднощі, пов'язані зі складними розрахунками, які спрямовані на опис поведінки потоку рідини, що перекачується. В останні роки розробки у галузі комп'ютерних наук і обчислювальної гідродинаміки зробили доступними надійні та ефективні інструменти для моделювання потоків рідини, які можна застосовувати під час проектування складних систем, зокрема елементів бурових насосів.

Перші спроби застосувати імітаційне моделювання методом скінчених елементів до проектування насосів були зроблені близько 30 років тому. Перші моделі базувалися на спрощених умовах Квазі-3D Ейлера. Пізніше були введені усереднені за Рейнольдсом рівняння Нав'є-Стокса, і врешті-решт були розроблені

багатофазні рідини та моделі масообміну між фазами.

Сьогодні доступно кілька програм як комерційних, так і з відкритим вихідним кодом. Серед тих, що базуються на традиційному підході кінцевого об'єму, найбільш поширені Ansys Fluent і FlowSimulation. Це програмне забезпечення включає не лише моделі для ньютонівських, але й для неньютонівських рідин.

Зазвичай під час дослідження гідродинамічних параметрів клапанів бурових насосів у якості рідини, що через них проходить, у найпростішому підході застосовують переважно воду. Проте вода є ньютонівською рідиною. Однак поведінка промивальних рідин є ньютонівською - зміна густини та в'язкості сильно залежить як від температури, так і від дії на рідину. Тому для отримання достовірніших результатів імітаційного моделювання необхідно використовувати відповідні моделі поведінки рідини.

У програмі FlowSimulation для опису поведінки промивальної рідини застосовують декілька різних моделей. Проте, після проведеного аналізу літературних джерел [6], для опису поведінки бурового розчину вибрано модель Гершеля-Балклі.

Для застосування цієї моделі поведінки рідини у програмі FlowSimulation в розділі «неньютонівські рідини» слід вибрати середовище "Slurry" (рис. 1).

На рисунку 2 показані властивості середовища "Slurry", які буде використано під час імітаційного моделювання.

Для проведення імітаційного моделювання побудовано тривимірну модель клапана бурового насоса, який розміщено у клапанній коробці (рис. 3).

Особливістю цієї моделі є те, що для подальшої роботи із нею застосовано ескіз із розміщеними на ньому лініями та точками (рис. 4). У

| Items | Item Properties | Tables and Curves |
|-------------------------|-----------------|--------------------------|
| Property | | Value |
| Name | | Slurry |
| Comments | | |
| Density | | 1647.2 kg/m ³ |
| Specific heat | | 4000 J/(kg*K) |
| Thermal conductivity | | 0.6 W/(m*K) |
| Viscosity | | Herschel-Bulkley model |
| Consistency coefficient | | 0.05546 Pa*s |
| Yield stress | | 5.8927 Pa |
| Power-law index | | 0.86523 |

Рисунок 2 – Властивості середовища "Slurry"

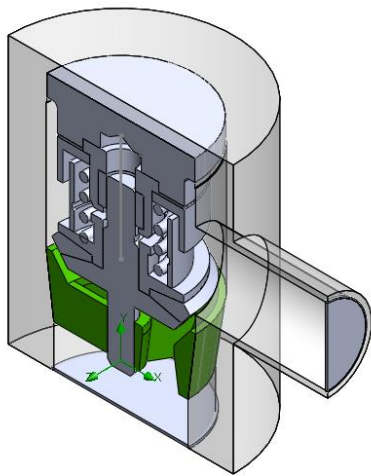


Рисунок 3 – Тривимірна модель клапана

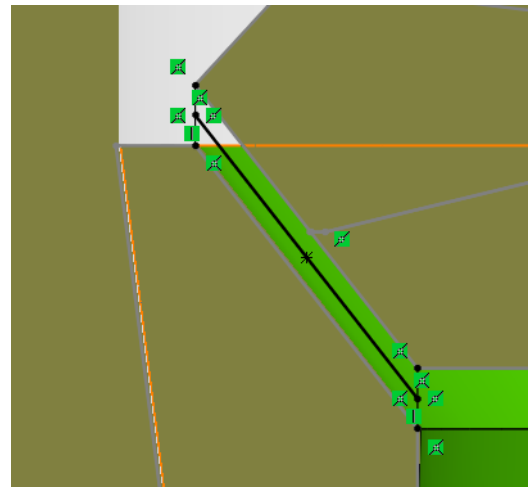


Рисунок 4 – Ескіз із середньою лінією та контрольними точками

цих точках можуть в подальшому контролюватись ряд параметрів (тиск, швидкість тощо). Також під час імітаційного моделювання буде застосовано параметричне дослідження, у якому змінним параметром буде зазор між сідлом та тарілкою клапана. Тому з метою контролю тиску у вищезгаданих точках (рис. 4) використано лінію, яка при зміні цього зазору завжди буде знаходитись посередині нього, і відповідно, точки контролю тиску також будуть знаходитись посередині.

Імітаційне моделювання роботи клапана бурового насоса (робоча рідина – вода)

На рисунку 5 наведено граничні умови, що використовуються у ході дослідження. Оскільки дослідженню підлягає вхідний клапан насоса, то тиск на вході у нього складає 0,1 МПа (1 атм), а витрата рідини, що проходить крізь нього – 0,006 м³/с.

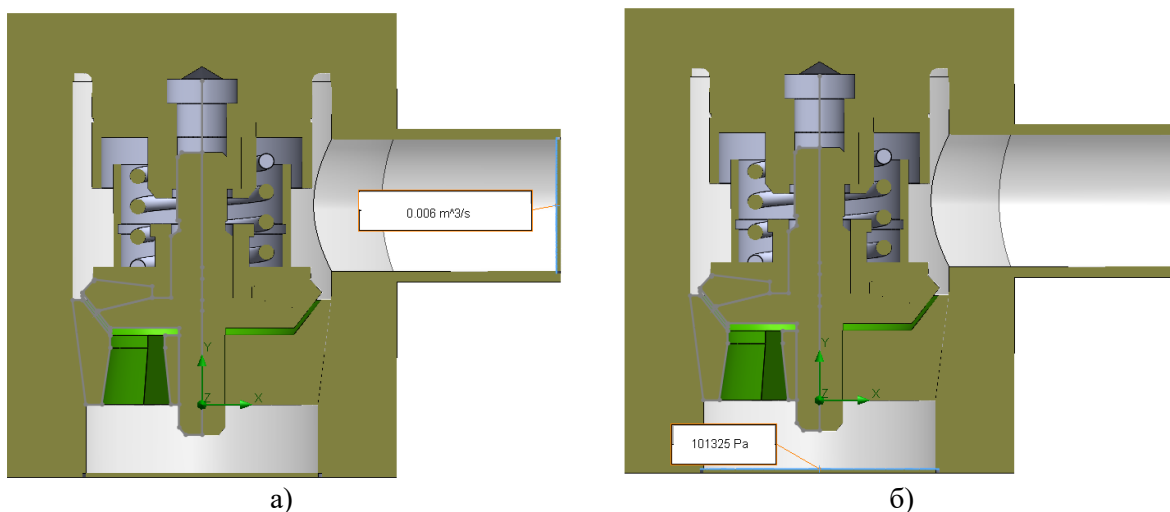
Оскільки під час дослідження особлива увага приділяється зазору між тарілкою та сідлом клапана, то, відповідно, і вимоги до розмірів сітки скінченних елементів зростають. Сітка

на моделі клапана зображена на рисунку 6, а, а сітка у зазорі між тарілкою та клапаном – на рисунку 6, б.

З метою визначення величини гідравлічного опору, що створюється клапаном бурового насоса залежно від висоти підйому його тарілки над сідлом, застосовано параметричне дослідження. У цьому дослідженні змінним параметром задано зміну зазору між сідлом та тарілкою, що варіюється у межах від 5 до 15 мм з кроком зміни 2,5 мм. За таких значень отримано п'ять розрахункових точок.

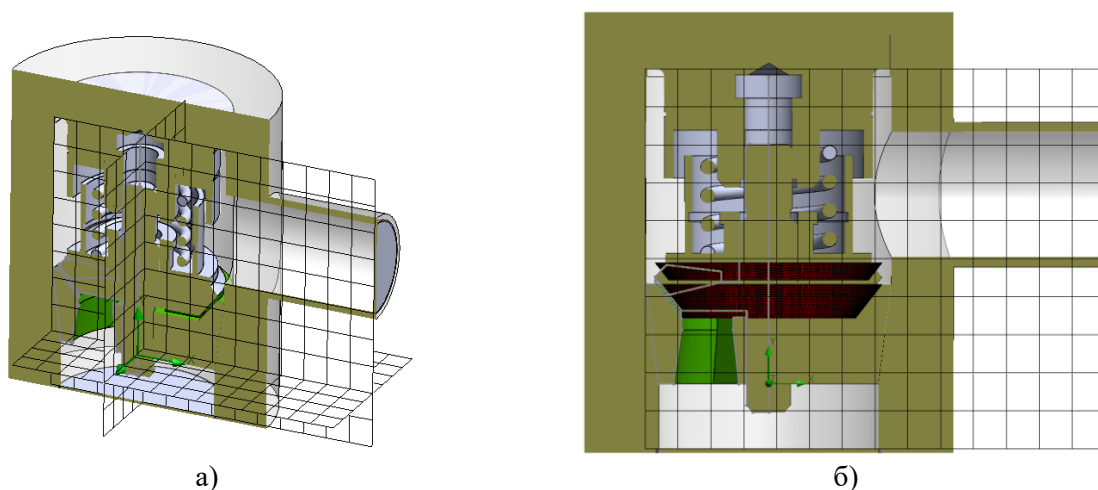
Контрольними параметрами (цілями) у дослідженні задано значення величин тиску в точках, що розміщені в зазорі між сідлом та тарілкою клапана (рис. 7). Точка P1 – тиск на виході із щілини, P2 – тиск посередині щілини; P3 – тиск на вході клапана.

Як результат дослідження, отримано значення тиску в контрольних точках залежно від зазору між тарілкою та сідлом. Для зручності перегляду отриманих результатів їх подано у графіку (рис. 8).



а) – витрата на виході з клапана; б) – тиск на вході в клапан

Рисунок 5 – Граничні умови



а) – глобальна; б) – глобальна та локальна у зазорі

Рисунок 6 – Сітка кінцевих об'ємів

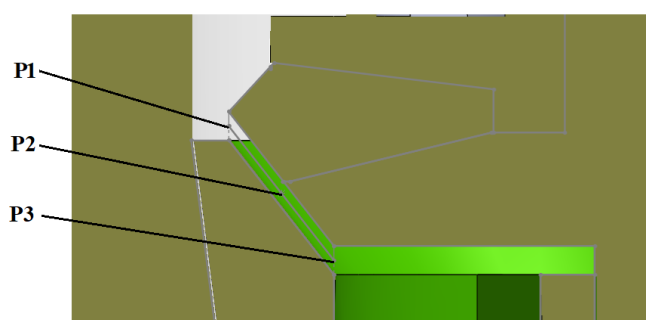


Рисунок 7 – Точки контролю тиску

Для дослідження величини гідравлічного опору, що створює клапан за різних величин зазорів між його сідлом та тарілкою, проведені аналогічно дослідження за вищенаведеним алгоритмом. Відрізняється тільки робоче середовище – буровий розчин.

Проаналізувавши отримані результати імітаційного моделювання, окрім побудованих

графічних залежностей, складено таблицю 1. В цій таблиці наведені значення величин тисків у розрахункових точках при дослідженні клапана на воді та буровому розчині. Також визначено величину гідравлічних опорів при використанні як робочої рідини води та бурового розчину (рис. 10).

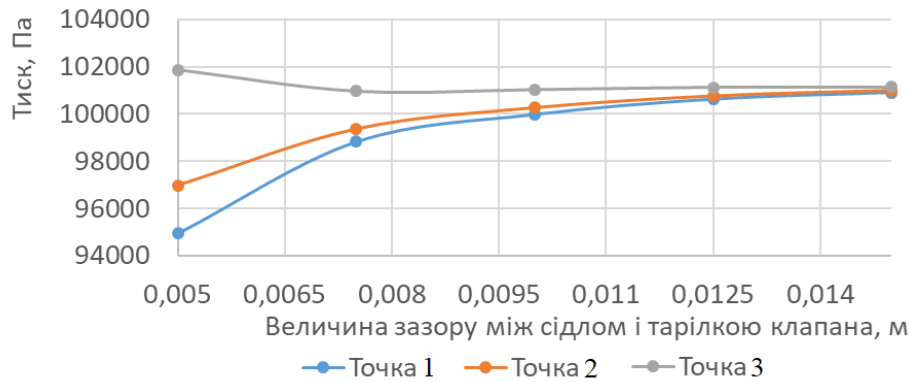


Рисунок 8 – Залежність зміни тиску від величини зазору між тарілкою та сідлом клапана

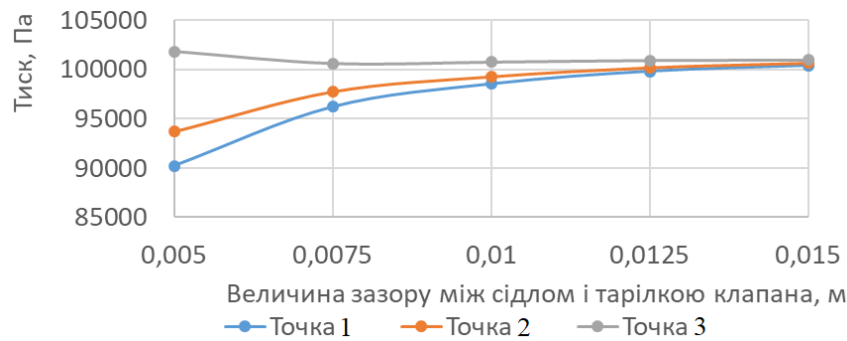


Рисунок 9 – Залежність зміни тиску від величини зазору між тарілкою та сідлом клапана

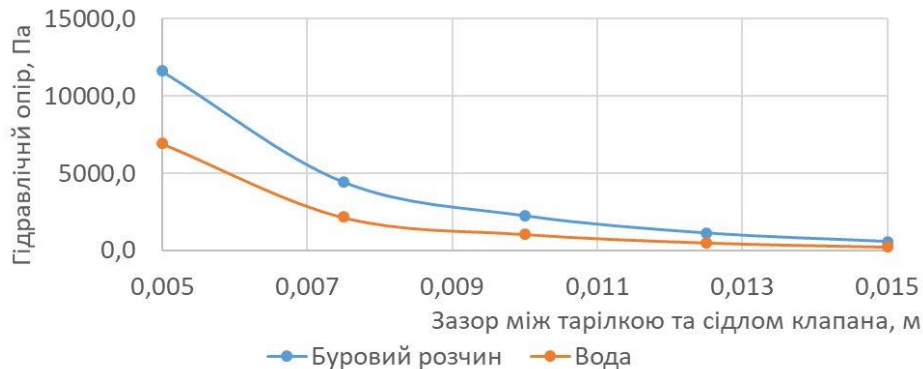


Рисунок 10 – Гідрравлічні опори за різного зазору між тарілкою та сідлом клапана при використанні робочих середовищ: буровий розчин; вода

Отже, під час імітаційних досліджень нафтогазового обладнання та подальших дій із ним (вдосконалення, реконструкції тощо) слід заздалегідь підбирати робоче середовище, характеристики якого є найбільш близькими до реальних його параметрів. Відхилення отриманих результатів величини гідрравлічних опорів при дослідженні клапана бурового насоса із використанням як робочої рідини води та бурового розчину наведено в таблиці 2.

Проведене імітаційне моделювання руху бурового розчину та води через щілину між сідлом та тарілкою клапана дозволило встановити величини гідрравлічних опорів. Їх порівняння показує відхилення в середньому на 48,7 %.

Отже, як бачимо з таблиці 2, середнє значення відхилення величини гідрравлічних опорів клапана при використанні у якості робочої рідини води та бурового розчину складає 48,7 %.

Висновки

Для дослідження гідродинамічних характеристик клапана бурового насоса для випадку різних властивостей промивальної рідини побудовано його тривимірну модель з можливістю її використання у параметричному дослідженні в програмі FlowSimulation.

Проведене імітаційне моделювання руху бурового розчину та води через щілину між сідлом та тарілкою клапана дозволило встановити величини гідрравлічних опорів. Їх порів-

Таблиця 1 – Результати досліджень

| | | Розрахункова точка 1 | Розрахункова точка 2 | Розрахункова точка 3 | Розрахункова точка 4 | Розрахункова точка 5 |
|--|---|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| Буровий розчин | Величина зазору, м | 0,005 | 0,008 | 0,010 | 0,013 | 0,015 |
| | P1, Па | 90234,8 | 96215,7 | 98538,3 | 99821,9 | 100410,0 |
| | P2, Па | 93715,4 | 97763,5 | 99286,1 | 100198,6 | 100660,2 |
| | P3, Па | 101835,9 | 100630,2 | 100763,9 | 100926,0 | 100960,1 |
| | Гідравлічний опір (буровий розчин) | 11601,0 | 4414,5 | 2225,6 | 1104,1 | 550,1 |
| Вода | Величина зазору, м | 0,005 | 0,0075 | 0,01 | 0,0125 | 0,015 |
| | P1, Па | 94944,1 | 98817,5 | 99976,6 | 100625,8 | 100905,4 |
| | P2, Па | 96975,9 | 99361,2 | 100259,8 | 100756,3 | 100990,3 |
| | P3, Па | 101867,9 | 100964,0 | 101028,1 | 101129,6 | 101137,7 |
| | Гідравлічний опір (вода) | 6923,9 | 2146,4 | 1051,5 | 503,7 | 232,3 |
| Різниця тисків при використанні бурового розчину та води | Величина зазору, м | 0,005 | 0,0075 | 0,01 | 0,0125 | 0,015 |
| | P1, Па | 4709,2 | 2601,8 | 1438,3 | 803,9 | 495,5 |
| | P2, Па | 3260,5 | 1597,7 | 973,7 | 557,7 | 330,0 |
| | P3, Па | 32,1 | 333,7 | 264,2 | 203,6 | 177,6 |
| | Різниця величини гідравлічного опору (буровий розчин та вода) | 4677,1 | 2268,1 | 1174,1 | 600,4 | 317,8 |

Таблиця 2 – Відхилення результатів моделювання клапана на воді та буровому розчині

| Точки | Розрахункова точка 1 | Розрахункова точка 2 | Розрахункова точка 3 | Розрахункова точка 4 | Розрахункова точка 5 |
|---------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| Відхилення, % | 59,7 | 48,6 | 47,2 | 45,6 | 42,2 |

няння вказує на відхилення в середньому на 48,7%.

Отже, під час проектування клапанів бурових насосів (чи схожого обладнання) з метою отримання достовірних результатів слід відповідально відноситись до вибору моделі поведінки рідини, враховувати якомога більше параметрів (в'язкість, густину, температуру тощо).

Література

1. Чаплінський С. С., Одосій З. М., Шиманський В. Я. Конструкції клапанних вузлів бурових насосів та шляхи їх покращення. *Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ*. 2010. № 3. С. 118-124.

2. Чаплінський С. С., Одосій З. М. Вплив нелінійності коефіцієнта витрати клапана на параметри його роботи. *Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ*. 2004. № 4. С. 100-104.

3. Концур І.Ф., Михайлюк З. М. Одосій В.В., Дейнега Р.О., Фафлей О.Я., Репало Д.С., Станович В.В. Дослідження та модернізація конструкції клапанного вузла бурового насоса. *Науковий вісник Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу*. 2020. № 1(48). С. 86-92. [https://doi.org/10.31471/1993-9965-2020-1\(48\)-86-92](https://doi.org/10.31471/1993-9965-2020-1(48)-86-92)

4. Лівак І. Д., Крупчин В. В., Лівак В. І., Муж М. П., Михайлюк В. В. Моделювання кавітації в клапанному вузлі бурового насоса. *Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ*. 2011. № 2(39). С. 59–63.

5. Baltaretu I., Miruna, Ulmanu V., Pupazescu A., Hadar A. Flow velocity as a factor of erosive wear of mud pump valves. *UPB Scientific Bulletin, Series D: Mechanical Engineering*. 2016. Vol. 78. P. 119-130.

6. Vytyaz O., Chudyk I., Mykhailiuk V. Study of the effects of drilling string eccentricity in the borehole on the quality of its cleaning. 2015.

5. Baltaretu I., Miruna, Ulmanu V., Pupazescu A., Hadar A. Flow velocity as a factor of erosive wear of mud pump valves. *UPB Scientific Bulletin, Series D: Mechanical Engineering*. 2016. Vol. 78. P. 119-130.

6. Vytyaz O., Chudyk I., Mykhailiuk V. Study of the effects of drilling string eccentricity in the borehole on the quality of its cleaning. 2015.

References

1. Chaplinskyi S. S., Odosii Z. M., Shyman-skyi V. Ya. Konstruktsii klapannykh vuzliv burovyykh nasosiv ta shliakhy yikh pokrashchennia. *Rozvidka ta rozrobka naftovykh i hazovykh rodovyshch*. 2010. No 3. P. 118-124. [in Ukrainian]

2. Chaplinskyi S. S., Odosii Z. M. Vplyv neliniinosti koefitsiienta vytraty klapana na parametry yoho roboty. *Rozvidka ta rozrobka naftovykh i hazovykh rodovyshch*. 2004. No 4. P. 100-104. [in Ukrainian]

3. Kontsur I.F., Mykhailiuk Z. M. Odosii V.V., Deineha R.O., Faflei O.Ia., Repalo D.S., Stanovych V.V. Doslidzhennia ta modernizatsiia konstruktsii klapannoho vuzla burovoho nasosa. *Naukovyi visnyk Ivano-Frankivskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu nafty i hazu*. 2020. No 1(48). P. 86-92. [https://doi.org/10.31471/1993-9965-2020-1\(48\)-86-92](https://doi.org/10.31471/1993-9965-2020-1(48)-86-92) [in Ukrainian]

4. Livak I. D., Krupchyn V. V., Livak V. I., Muzh M. P., Mykhailiuk V. V. Modeliuvannia kavitatsii v klapannomu vuzli burovoho nasosa. *Rozvidka ta rozrobka naftovykh i hazovykh rodovyshch*. 2011. No 2(39). P. 59–63. [in Ukrainian]