

**ЧИСЕЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТЕЧІЇ ГАЗОРІДИННОЇ СУМІШІ
У МАЛОГАБАРИТНІЙ ШНЕКОВІЙ СТУПЕНІ
СВЕРДЛОВИННОГО НАСОСА**

І.П. Каплун, канд. техн. наук;

О.А. Демченко, студентка,

Сумський державний університет, м. Суми

Проблема перекачування газорідинних сумішей є актуальною для ряду галузей, у тому числі й нафтовидобувної промисловості. Шнекова ступінь заглибного свердловинного насоса поєднує у собі економічність, високу технологічність та оптимальні масогабаритні показники. Дослідження проводилося шляхом чисельного моделювання течії чистої рідини та газорідинної суміші у каналах ступені. Отримані енергетичні та напірні характеристики, а також розподіл швидкостей і тисків у проточній частині ступені.

Ключові слова: *перекачування газорідинних сумішей, заглибний свердловинний насос, моделювання течії.*

Проблема перекачивания газожидкостных смесей актуальна для ряда отраслей промышленности, в том числе и нефтедобывающей. Шнековая ступень погружного скважинного насоса объединяет в себе экономичность, высокую технологичность и оптимальные массогабаритные показатели. Исследование проводилось путем численного моделирования течения чистой жидкости и газожидкостной среды в каналах ступени. Полученные параметры ступени дают основания ожидать, что она может быть работоспособной при работе на газожидкостной среде.

Ключевые слова: *перекачивание газожидкостных смесей, погружной скважинный насос, моделирование течения.*

ВСТУП

Із розвитком сучасної промисловості значно загострилася проблема перекачування газорідинних сумішей (ГРС). Потреба у надійному та простому насосному обладнанні для переміщення газовмісних рідин є у цілому ряді галузей: нафтовидобувній та переробній, хімічній, целюлозній, харчовій, у біотехнологіях та медицині, енергетиці тощо.

Традиційними насосами для перекачування ГРС вважаються насоси об'ємного типу (наприклад, гвинтові насоси виробництва ВАТ «Лівгідромаш») [1], але вони мають досить високу вартість та порівняно низьку надійність.

Для перекачування сумішей з великими концентраціями газу (до 40-50%) створені спеціальні конструкції проточних частин, які дозволяють розділити газоподібну та рідку фази [2]. Також використовують одно- чи дволопатеві робочі колеса, які уже знайшли широке використання при перекачуванні рідинно-твердих гідросумішей у різних галузях промисловості [3]. Експериментально було встановлено, що максимальна кількість газової фази, при якій ще можлива усталена робота відцентрового насоса при використанні однолопатевого робочого колеса становить 52%, а у разі використання дволопатевого робочого колеса – 34% від загального об'єму перекачуваної суміші. Однак наявність вільного газу знижує напір, подачу та ККД насоса, погіршується як всмоктувальна спроможність насоса, так і вібраційні характеристики [2].

У порівнянні з відцентровим вихровий насос компактніший (напір в 3-9 разів більший при тих самих розмірах та частоті обертання), конструкція простіша та дешевша. Вихрові насоси можуть успішно працювати на суміші рідини та газу [2]. Недоліком вихрового насоса є

низький ККД, який не перевищує в оптимальному режимі 45% (у найбільш поширених – ККД 35-38%).

Ще одним з насосів, які можуть успішно працювати на ГРС, є насос осьового типу. Максимальна кількість газу в перекачуваному середовищі, при якій ще можлива стійка робота осьового насоса становить приблизно 30% від загального об'єму суміші. Максимальний ККД такого насоса становить 65% [3].

Проте кожен з зазначених типів насосів має ті чи інші недоліки і не вирішує повністю проблему перекачування ГРС.

ПОСТАНОВКА ТА АКТУАЛЬНІСТЬ ПРОБЛЕМИ ПЕРЕКАЧУВАННЯ ГРС

Якщо розглядати проблему з боку нафтовидобувної промисловості, а саме видобутку нафти заглибними свердловинними насосами, то додатково, крім перелічених вище, з'являється ще ряд специфічних проблем:

- перекачуване середовище має багатокомпонентний склад (нафта, супутній газ, вода, абразивні частинки породи), і його характеристики з часом змінюються у широких межах;
- значна корозійна активність перекачуваного середовища;
- висока температура у зоні підвіски насоса (120-150 °С);
- висока вартість спуско-підйомних робіт.

На рисунку 1а представлена класична схема установки заглибного свердловинного насоса для видобутку нафти (УЕВН). Для вирішення проблеми перекачування ГРС до складу установки УЕВН входить газосепаратор (рис. 1б), призначений для зменшення об'ємного вмісту газу у перекачуваному середовищі.

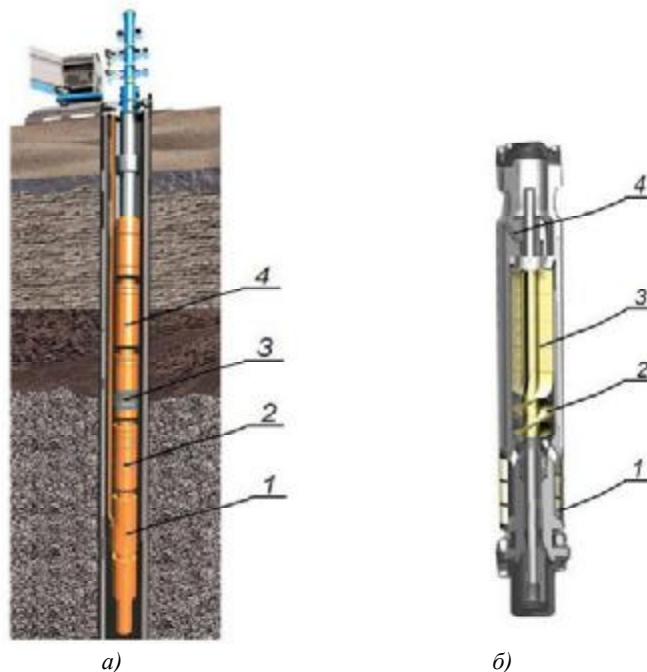


Рисунок 1 – а) установка заглибного свердловинного насоса для видобутку нафти (УЕВН): 1 – привідний заглибний електродвигун, 2 – гідрозахист двигуна, 3 – газосепаратор, 4 – відцентровий насос типу ЕВН (Е – електричний, В – відцентровий, Н – насос); б) конструктивна схема газосепаратора: 1 – прийомна сітка, 2 – шнек, 3 – сепаратор, 4 – канал відводу газу

Виходячи з усього викладеного раніше, можна зробити висновок, що найбільш перспективною для розвитку свердловинного насосного обладнання для видобутку газонасиченої нафти є розробка нових конструкцій, у тому числі на основі малогабаритних шнекових ступенів зі спрощеною геометрією, ефективність яких уже доведена на практиці [4].

Такий тип робочих коліс надзвичайно ефективно використовується в умовах кавітації та суперкавітації [7] і [8], це дає підстави очікувати, що він буде достатньо добре експлуатуватися при перекачуванні газорідних сумішей, у тому числі суміші нафти та супутнього газу. Крім того, робочі органи такого типу порівняно легко виготовляти.

Варто відзначити, що використання робочих органів зазначеного типу для перекачування пластових газомісних рідин є світовою тенденцією. Прикладом може служити наземний насос фірми Sulzer [5] (рис. 2). За даними фірми такий насос може перекачувати суміші зі значним об'ємним вмістом газу (від 0 до 100%).

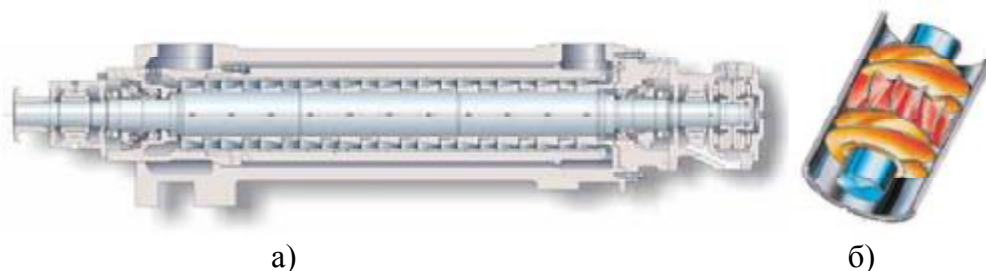


Рисунок 2 – а) насос фірми Sulzer для перекачування газорідних сумішей;
б) геліко-осьова ступінь насоса

Використання ступенів шнекового типу дає можливість створювати високовитратні насоси з відносно малими радіальними габаритами, що дозволить експлуатувати на родовищах меншу кількість одиниць обладнання у свердловинах меншого діаметра при збереженні об'ємів видобутку, забезпечуючи тим самим значний економічний ефект.

Проблема полягає у тому, що розрахунок робочих органів насосів для роботи на газорідних сумішах є дуже складною задачею. Зважаючи на те, що загальної та достатньо точної методики розрахунку нам не вдалося виявити, було прийнято рішення виконувати розрахунок за допомогою чисельного моделювання в університетській версії програмного продукту ANSYS CFX.

МЕТОДИКА ЧИСЕЛЬНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ТЕЧІЇ ЧИСТОЇ РІДИНИ ТА ГРС У КАНАЛАХ СТУПЕНІ

При розрахунку густини рідини була прийнятою за сталу величину. Моделювання турбулентних течій здійснювалося за допомогою рівнянь Рейнольдса, для замикання яких використовувався ряд моделей турбулентності (k- ϵ , SST та ін.).

Проведення чисельного експерименту у рамках цього дослідження складалося з кількох етапів: підготовки просторової геометричної моделі, побудови розрахункової сітки та введення вихідних даних для розрахунку і власне розрахунку.

Розрахункова сітка (рис. 3) була створена у програмному продукті ANSYS Workbench, у статорному апараті вона налічувала 584 тис. комірок, у робочому колесі – 791 тис. комірок. Для належного опису приміжових шарів поблизу твердих стінок у статорному апараті було створено 10 шарів призматичних комірок, у робочому колесі – 12.

Розрахунок проводився у два етапи: при стаціонарній постановці задачі та при нестаціонарній постановці.

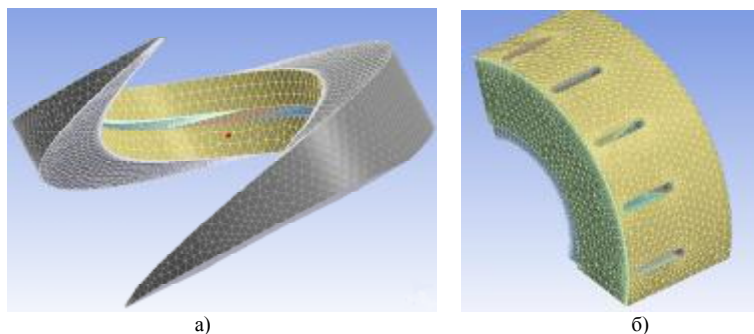


Рисунок 3 – Розрахункова сітка моделі рідини: а) в одному каналі робочого колеса; б) у п'яти каналах статорного апарата

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ

У рамках викладеної вище методики чисельного моделювання, за допомогою програмного продукту ANSYS CFX було виконано розрахунок потоку рідини у досліджуваній проточній частині шнекової ступені заглибного свердловинного насоса. Розрахунок виконувався для двох випадків: для чистої рідини (об'ємний газовміст дорівнює нулю) та для газорідинної суміші (об'ємний газовміст дорівнює 5%). Течія газорідинної суміші описувалася одним набором рівнянь, складених на підставі підходу Ейлера, що припустимо через малу концентрацію повітря у ГРС.

Сутність підходу Ейлера [6] полягає у тому, що рух рідини описується зміною поля швидкостей у фіксованих точках розрахункової області.

Моделювання проводилося для чистої рідини у діапазоні подач від 400 до 900 м³/добу, для газорідинної суміші (об'ємний газовміст 5%) від 400 до 700 м³/добу.

На рис. 4 поданий приклад осереднення параметрів шнекової ступені. Розрахунок проводився при значенні подачі 600 м³/добу, при цьому було отримано осереднене значення напору ступені, що дорівнює 4,2 м, а коефіцієнт корисної дії дорівнює 51%.



Рисунок 4 – Осереднення параметрів шнекової ступені за даними розрахунку (на прикладі напору)

На рис. 5 та 6 зображені напірні та енергетичні характеристики ступені при роботі на чистій рідині та газорідній суміші з об'ємним газовмістом 5%. Як бачимо, з появою газової фази параметри ступені знижуються.

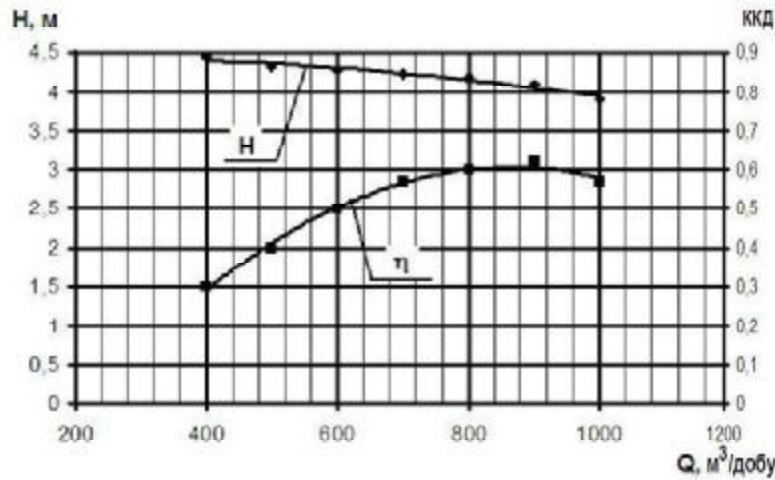


Рисунок 5 – Напірна та енергетична характеристика шнекової заглибної ступені свердловинного насоса під час роботи на чистій рідині

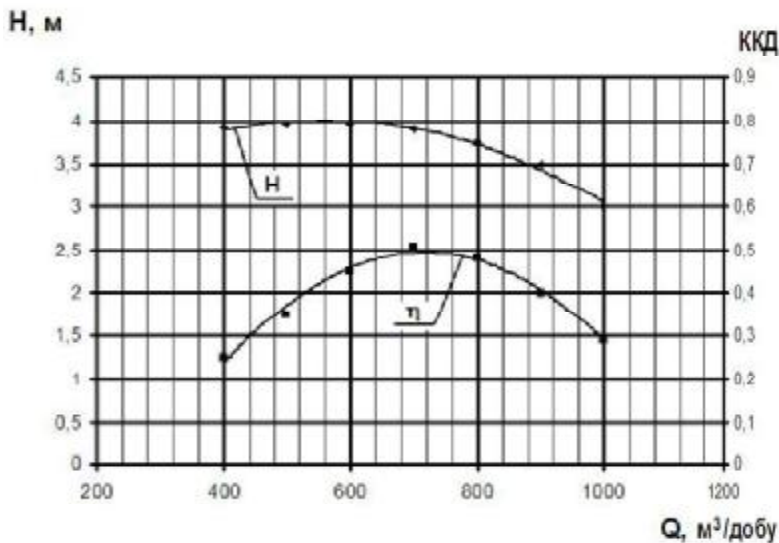


Рисунок 6 – Напірна та енергетична характеристика шнекової заглибної ступені свердловинного насоса під час роботи на газорідній суміші з об'ємним газовмістом 5%

На рис. 7 подана картина течії у робочому колесі досліджуваної ступені на чистій рідині. Під час проведення аналізу картини течії у каналах ступені основна увага приділялася робочому колесу, оскільки передбачається, що саме у ньому будуть відбуватися процеси, які вирішальним чином вплинуть на роботу ступені на газорідній суміші. Поверхня камери робочого колеса умовно не показана.

Аналізуючи розподіл статичного тиску (рис. 7а) на поверхнях втулки та лопатей робочого колеса, можна зробити висновок, що основний поворот потоку відбувається у його вхідних перерізах, про що свідчать і

перетікання через радіальний зазор (рис.7 б). У цілому картина течії подібна до картин отриманих у вхідних пристроях насосів агрегатів живлення двигунів рідкопаливних ракет, що докладно вивчалися, наприклад, у [7] та [8].

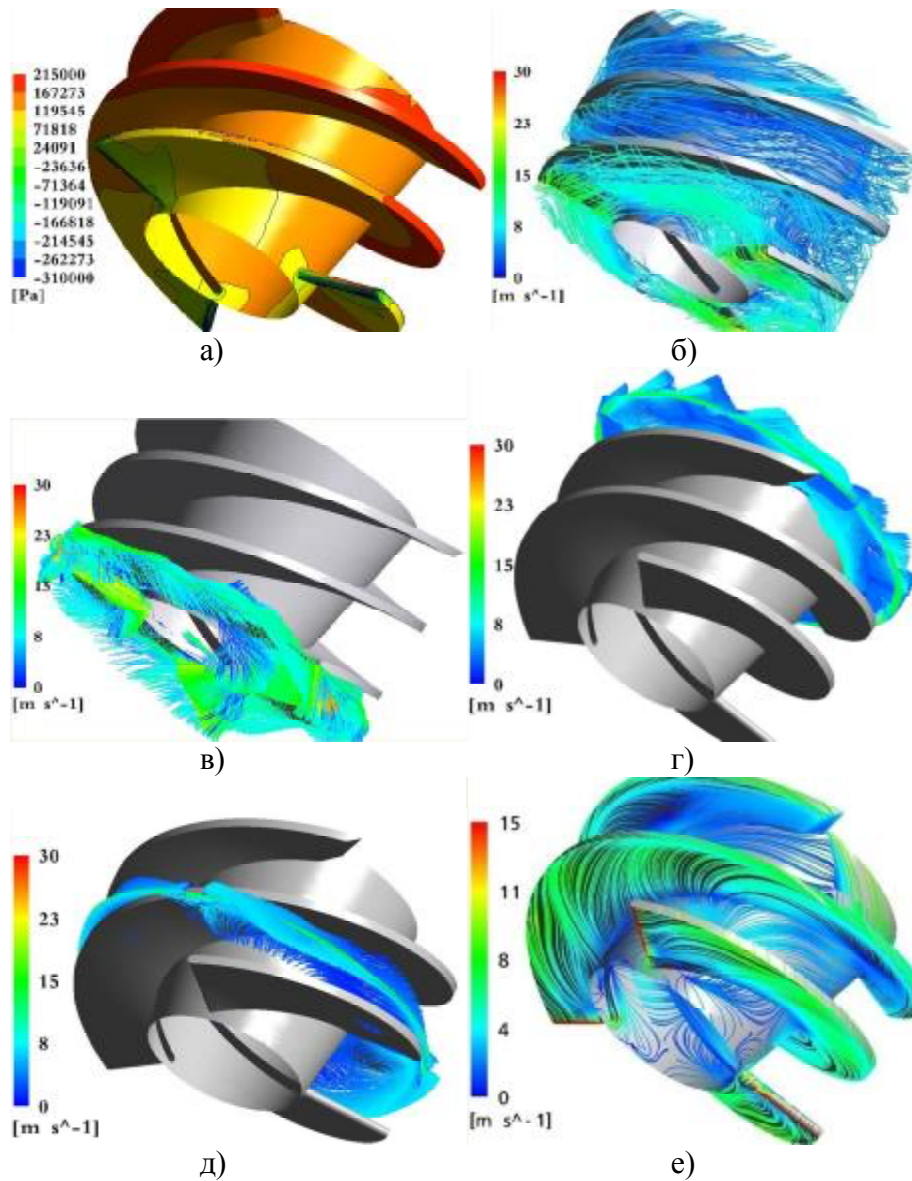


Рисунок 7 – Картина течії у робочому колесі досліджуваної ступені на чистій рідині. Подача $600 \text{ м}^3/\text{добу}$. Розподіл миттєвих швидкостей та тисків (осереднення не проводилося):

- а) розподіл статичного тиску у проточній частині робочого колеса;
- б) лінії течії абсолютної швидкості у міжлопатевих каналах робочого колеса;
- в) вектори абсолютної швидкості у вхідному перерізі робочого колеса;
- г) вектори абсолютної швидкості у вихідному перерізі робочого колеса;
- д) вектори абсолютної швидкості у перерізі робочого колеса, розташованому на відстані 20мм від вхідного перерізу ;
- е) лінії течії на поверхні робочого колеса

Потік у міжлопатевому каналі має складну структуру та тривимірний характер з чітко вираженими вихровими структурами, які добре ілюструють рисунки векторів відносної швидкості (рис.7 в-д).

При зміні подачі ступені від 400 м³/добу до 900 м³/добу різких змін у картині течії не відбувається.

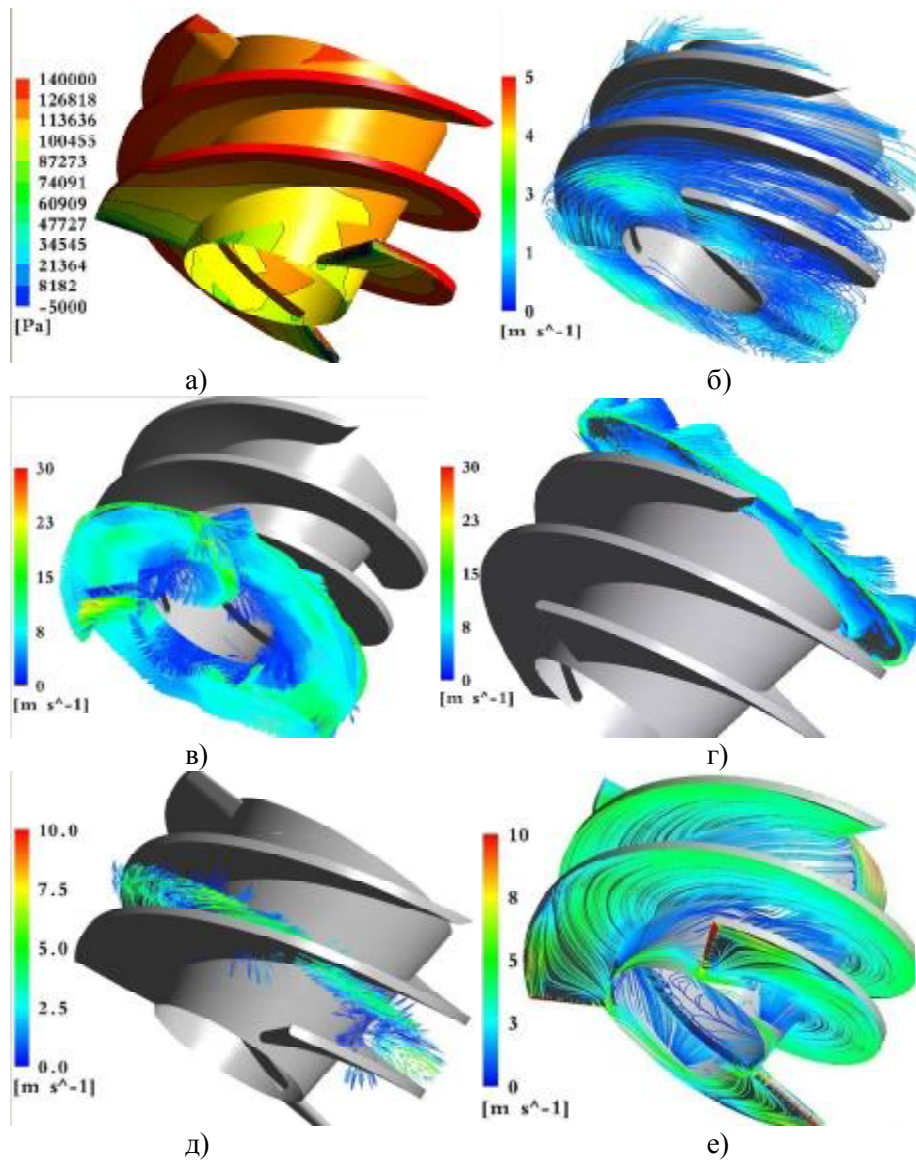


Рисунок 8 – Картина течії у робочому колесі досліджуваної ступені на газорідній суміші (об'ємний вміст газу 5%). Подача - 600 м³/добу. Розподіл миттєвих швидкостей та тисків (осереднення не проводилося):

- а) розподіл статичного тиску у проточній частині робочого колеса;
- б) лінії течії абсолютної швидкості у міжлопатевих каналах робочого колеса;
- в) вектори абсолютної швидкості у входному перерізі робочого колеса;
- г) вектори абсолютної швидкості у вихідному перерізі робочого колеса;
- д) вектори абсолютної швидкості у перерізі робочого колеса, розташованому на відстані 20мм від входного перерізу ;
- е) лінії течії на поверхні робочого колеса

Аналізуючи результати роботи проточної частини на газорідинній суміші (рис. 6) можемо зробити висновок, що оптимальна робоча зона знаходиться у діапазоні подач 700...800 м³/добу. Значення менше, ніж розрахункове, що пояснюється зменшенням значення напору при перекачуванні газорідинних сумішей у порівнянні з перекачуванням чистої рідини. Саме тому при проектуванні робочих органів на чистій рідині ми брали розрахункові значення подачі та напору вищими, ніж ті, які необхідно отримати. Також, аналізуючи рис. 7 б і 8 б можна зробити висновок, що суттєвих якісних відмінностей у картині течії на ГПС при газовмісті 5% та на чистій рідині не спостерігається. Причиною цього може бути те, що значення газовмісту достатньо невелике.

У цілому за допомогою чисельного моделювання були отримані напірна та енергетична характеристики шнекових робочих органів при перекачуванні чистої рідини та газорідинної суміші. Коефіцієнт корисної дії має помірне значення, але при постановці задачі надавалася перевага працездатності, а не показникам його енергоефективності.

Наведені результати мають певною мірою попередній характер, оскільки на даний час розрахунок триває. У майбутньому планується створення експериментального стенду, на якому буде випробувано ступінь шнекового заглибного свердловинного насоса при різних значеннях об'ємного газовмісту. Це допоможе сформулювати основні вимоги щодо проектування даних ступенів, а також визначити емпіричні коефіцієнти для створення методики розрахунку такої ступені.

ВИСНОВКИ

У результаті проведення чисельного моделювання течії в каналах малогабаритної шнекової ступені було:

- отримано напірні та енергетичні характеристики ступені на чистій рідині та на ГПС при вмісті газу 5%;
- отримано розподіли тисків та швидкостей у проточній частині досліджуваної ступені;
- виявлено, що потік у міжлопатевих каналах робочого колеса має складну структуру та тривимірний характер.

На основі вищевикладаного є доцільним продовження роботи у зазначеному напрямку з проведенням не лише чисельного моделювання, а й фізичного експерименту на дослідному стенді для створення методики проектування малогабаритної шнекової ступені для перекачування ГПС.

SUMMARY

NUMERICAL SIMULATION OF FLOW OF A PURE LIQUID AND A MIXTURE OF GAS AND LIQUID IN THE AXIAL FLOW SCREW-TYPE STAGE OF BOREHOLE SUBMERSIBLE PUMP

I.P. Kaplun, O.A. Demchenko
Sumy State University, Sumy

Pumping of gas and liquid mixtures is of vital importance for a number of industries, including oil production. A stage incorporating an axial flow screw-type impeller, which is offered for the used in borehole submersible pumps, features economical effect, manufacturability and optimum mass and overall dimensions. Investigations have been performed by numerical simulation of flow of a pure liquid and mixture of gas and liquid in the stage hydraulic passages. The obtained results of stage performance cause to anticipate that it can be also efficient when handling a gas-and-liquid mixture.

Key words: *Pumping of gas and liquid mixtures, an axial flow screw-type impeller.*

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. www.livgidromash.ru
2. Сапожников С.В. Учет газовой составляющей перекачиваемой среды при определении конструкции и рабочей характеристики динамического насоса: дис... канд. техн. наук: 05.05.17 - Сумы, 2005. – 206 с.

3. Колисниченко Э.В. Рабочий процесс динамических насосов нетрадиционных конструктивных схем на газожидкостных смесях: дис... канд. техн. наук: 05.05.17. - Сумы, 2007 – 164 с.
4. Елин А.В. Шнековые многоступенчатые насосы: методика расчета, показатели качества: дис... канд. техн. наук: 05.05.17. – Сумы, 2002. – 230 с.
5. www.sulzerpumps.com
6. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. – М.: Государственное издательство технико-теоретической литературы, 1950. – 676 с.
7. Овсянников В.Б. Теория и расчет агрегатов питания жидкостных ракетных двигателей / В.Б. Овсянников, Б.И. Боровский. - М.: Машиностроение, 1979. – 343 с.
8. Высокооборотные лопаточные насосы /под ред. Б.В. Овсянникова и В.Ф. Чебаевского. – М.: Машиностроение, 1975. – 336 с.

Надійшла до редакції 5 червня 2009 р.