

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

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

Шудрик Олександр Леонідович

УДК 621.65.03, 532.5

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

05.05.17 – гідравлічні машини та гідропневмоагрегати
13 – механічна інженерія

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело
_____ О.Л. Шудрик

Науковий керівник Шевченко Наталія Григорівна, кандидат технічних наук,
доцент

Харків – 2018

АНОТАЦІЯ

Шудрик О.Л. Підвищення ефективності використання відцентрових насосів за рахунок вдосконалення математичних моделей робочого процесу. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук (доктора філософії) за спеціальністю 05.05.17 «Гідравлічні машини та гідропневмоагрегати» (133 – Галузеве машинобудування). – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, 2018.

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

Виконано аналіз 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 та неньютонівських рідин та багатофазних газорідинних сумішей.

Описано особливості експлуатації та конструкції заглибних електровідцентрових насосів, що призначені для перекачки газорідинних сумішей. Специфіка конструкції насосів даного типу визначає відмінності від поверхневих відцентрових насосів при математичному моделюванні їх робочого процесу.

Визначено, що на енергетичні характеристики насоса впливають такі фактори як конструкція насоса, глибина підвіски та властивості рідини, що відкачується.

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 в область менших подач. Виявлено, що рідина змінює свої реологічні властивості в залежності від об'ємної долі води.

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

Проведено аналіз Бугреватського родовища. Визначено найбільш поширений тип насосів зі швидкохідністю 80-125.

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*, котрий задовольняє точністю отриманих результатів та простотою використання. Також враховувався факт, що даний пакет являється відкритим.

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.

Для апробації пакету *OpenFOAM* та моделі турбулентності були проведені тестові розрахунки тривимірної течії в'язкої рідини в трубі змінного перетину та в міжлопатевому каналі робочого колеса насоса. Результати порівнювались з пакетом *Ansys CFX stud. ver.*, котрий добре себе зарекомендував при розрахунках турбомашин та вважається стандартом галузі.

Проведено чисельний експеримент, де досліджувалась течія рідини в проміжній ступені заглибного електровідцентрового насоса. Побудовано напірні та енергетичні характеристики, що якісно узгоджуються з паспортними даними, що дало змогу оцінити правильність вибору моделі турбулентності, якість побудованої сітки та задання граничних умов. Визначено вплив шорсткості поверхонь робочих органів на характеристики насоса.

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.

Отримано і проаналізовано візуалізацію потоку в проточній частині ступені насоса. Встановлено, що при перекачуванні неньютонівських в'язких рідин відбувається зменшення відривних зон потоку. Даний факт позитивно впливає на напірні та енергетичні характеристики насоса в порівнянні із ньютонівськими рідинами тієї ж в'язкості. Запропоновано для розрахунку числа Рейнольдса, з метою подальшого перерахунку характеристик на іншу в'язкість, використовувати найбільш раціональну формулу, запропоновану Ляпковим П.Д..

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*.

Наведено порівняння розрахунків робочого колеса та ступені насоса, що дало змогу виявити взаємний вплив робочих органів при перекачуванні газорідинних сумішей. Отримано коефіцієнти для перерахунку напору при об'ємному газовмісті в рідині до 10%. Візуалізовано картину течії, котра вказує на правильність розрахунку, на що вказує порівняння структури течії тривимірного розрахунку і швидкісної фотозйомки. За допомогою перерахункових коефіцієнтів побудовані напірні та енергетичні характеристики, що порівнювалися з експериментальними даними. Внаслідок чого розбіжність сказала 3-5 %.

Визначено, що розчинений у в'язкій неньютонівській рідині, має позитивний вплив на характеристики насоса, а саме за рахунок зменшення в'язкості рідини відбувається покращення напірних та енергетичних характеристик, зміщення оптимуму в область більших подач.

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. Досліджено вплив зняття покривного диску на характеристики насоса та диспергацію газових бульбашок.

Досліджено основні принципи «конічної» збірки насоса та представлено алгоритм для її оптимальної компоновки.

Розглянуто та вдосконалено математичну модель сумісної роботи заглибного відцентрового насоса у вигляді пакета прикладних програм. Це дало змогу визначати основні фізичні характеристики рідини в залежності від термодинамічних умов. Проведено верифікацію розрахункових та промислових даних. Розбіжність склала не більш як 8 %. Це дало змогу правильно та в стислі строки визначити найбільш раціональну глибину установки насоса та досягти максимально можливого ККД при його сумісній роботі на реальній рідині.

Ключові слова: заглибний насос, робоче колесо, направляючий апарат, обчислювальна гідродинаміка, водонафтова емульсія, газорідинна суміш, напірність, модифікована ступінь, конічна збірка, математична модель.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА

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

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

3. Шевченко Н.Г. Комплекс програм для прогнозування характеристик роботи УЕВН / Н.Г. Шевченко, О.Л. Шудрик, А.В. Мірзоян // Матеріали ІХ Міжнародної науково-практичної студентської конференції магістрантів. м. Харків. – 2015. – С. 105–106.

4. Шудрик О.Л. Чисельне прогнозування інтегральних характеристик в ступені заглибного відцентрового насоса EBH5-80 / О.Л. Шудрик // XX Міжнародна науково-технічна конференція «Гідроаеромеханіка в інженерній практиці». – К. : НТУУ «КПІ», 2015. – С. 141-142.

5. Шевченко Н.Г. 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.

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

7. Шевченко Н.Г. 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 XXIII Міжнародної науково-практичної конференції «MicroCAD». – Т. 1– X. : НТУ «ХПІ», 2015. – С. 303.

8. Шевченко Н.Г. Исследование течения газожидкостной смеси в проточной части ступени погружного насоса для добычи нефти / Н.Г. Шевченко, А.Л. Шудрик, Е.Ю. Бондаренко // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Hydraulic machines and hydrounits. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2017. – No 22(1244). – P. 31–37.

9. Шудрик О.Л. Моделювання фізичних властивостей газорідної суміші у свердловині / О.Л. Шудрик // XII Міжнародній науково-технічній конференції «Бъдешите изследвания». – Софія: «Бял-ГРАД-БГ» ООД, 2016. – С. 26-29.

10. 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» ІМ – 2016. – Івано-Франківськ : ІФНТУНГ, 2016.

11. Shudryk A.L. Using open software application packages for simulation of viscous incompressible fluid / A. L. Shudryk // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Hydraulic machines and hydrounits. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2016. – No 20 (1192). – P. 90–93.

12. Дранковский В. Э. 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.

13. 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.

14. Шевченко Н.Г. 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.

15. Шевченко Н.Г. Особенности расчета характеристики погружного центробежного насоса с учетом изменения параметров газожидкостной смеси вдоль / Н.Г. Шевченко, А.Л. Шудрик, Д.В. Бельмас // Промислова гідравліка і пневматика. – Вінниця : ВНАУ, 2017. – №3(57). – С. 35-38.

16. 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 // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Hydraulic machines and hydrounits. – Kharkov : NTU "KhPI", 2017. – No. 42 (1264). – P. 51–55.

17. 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.

18. 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 «ХПІ». – № u201700051; заявл. 03.01.2017; опубл. 10.07.2017, Бюл. № 13.

19. 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 «ХПІ». – № u201700063; заявл. 03.01.2017; опубл. 10.07.2017, Бюл. № 13.

20. Шудрик О.Л. Комп'ютерна програма «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.

ABSTRACT

Shudryk O.L. Increasing of efficiency of the use of centrifugal pumps by perfection of mathematical models of working process. – The qualification scientific work on the manuscript.

The dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences (Ph. D.) in the specialty 05.05.17 «Hydraulic machines and hydropneumatic units» (133 – Branch Engineering). – National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, 2018.

Dissertation is devoted to the decision of important scientific and technical task of increase of efficiency of compatible work of well and submersible electro-centrifugal pump during his work on the real liquid that presents a mixture of oil, water and gas by perfection of mathematical models.

The analysis of conceptions of development of power machine building is executed in Ukraine. The regularities, that one of perspective scientific work assignments there is a mathematical modeling of working processes and technologies in this industry.

The numerical and mathematical design, feature of working process in the channels of hydromashines taking into account the real factors of their exploitation are shown. Basic directions and going are analyzed near the design of flows of newtonian and non-newtonian liquids and multiphase gas-liquid mixtures are analyzed.

The features of exploitation and construction of submersible electro-centrifugal pumps are described, that the oils intended for the mechanized booty, during their work in the real well. The specific of construction of pumps of this type determines differences from superficial pumps at the mathematical modeling of their working process.

It was determined that the pump power characteristics influenced by such factors as the design of the pump, depth and suspension properties liquid pumped.

Found that indicators such as watering product, its viscosity and the presence of free gas pressurized degrade not only the characteristics of the pump, but also energy, thus shifting the optimum region in less innings. Found that the fluid changes its rheological properties depending on the volume fractions of water.

Determined that conversion characteristics of centrifugal pumps, there are many methods, but they do not address the complex rheological properties of fluids and the presence of gas.

Analysis Buhrevate field. The most common type of pump fleetness 80-125.

The methods of mathematical modeling of three-dimensional motion of a viscous fluid and their real advantages over physical experiments. Chosen software package for numerical experiment channels submersible pumps OpenFOAM, which satisfies the accuracy of the results and ease of use. Also take into account the fact that the package is opened.

To simulate fluid flow in the flow of the pump used system of equations of continuity and Navier-Stokes equations. For its closure was selected $k-\varepsilon$ turbulence model.

For testing package *OpenFOAM* turbulence model and test calculations were performed three-dimensional flow of viscous fluid in a tube of variable section and mizhlopatevomu channel impeller pump. Results were compared with a package of *Ansys CFX stud. ver.*, which worked well in the calculation of turbomachinery and is considered the industry standard.

The numerical experiment, which studied the fluid flow in the intermediate stage submersible pump. Built pressure and power characteristics in good agreement with passport data, allowing us to evaluate the correct choice of turbulence model, the quality of the constructed network and setting boundary conditions. The influence of surface roughness on the characteristics of the working pump.

The influence of rheological properties of non-Newtonian fluids on the characteristics of a centrifugal pump. The mathematical model of three-dimensional turbulent flow of non-Newtonian fluids. For calculation model chosen Non-

Newtonian Fluid Herschel-Bulkley that most accurately describes the behavior of liquids of this type.

An analysis and visualization of flow in the flow rate of the pump. Found that when pumping viscous non-Newtonian fluids decreases vortices flow zones. This fact positively affects the pressure pump and energy characteristics compared to the same Newtonian fluids viscosity. A calculation Reynolds number for further conversion into another viscosity characteristics, to use the most efficient formula proposed Lyapkov P.D.

Defined and the approach and the mathematical model to simulate the three-dimensional motion of a viscous gas-liquid mixture and features shown in the calculation of this type of liquid in the package *OpenFOAM*.

The comparison calculation stage impeller and pump, which made it possible to identify the mutual influence of working at pumping gas-liquid mixtures. Coefficients for converting the pressure with a volume in fluid gas content to 10%. Visualized flow pattern which indicates the correct calculation, as indicated by comparing current three-dimensional structure and calculate speed photography. With Recalculating factor built pressure and power characteristics were compared with experimental data. As a result, said difference of 3-5%.

Determined that dissolved in viscous non-Newtonian fluid, has a positive effect on the characteristics of the pump, namely by reducing the viscosity of the fluid is improving pressure and power characteristics, optimum shift towards more innings.

The ways of improving the efficiency of submersible pumps by changing the flow part. Rational angle output edge. A modified level of the pump, which is protected by patent of Ukraine for pumping liquids with a high content of gas. The effect of removing the cover disk on the characteristics of the pump and dispersion of gas bubbles.

The basic principles of «cone» pump assembly and presented its algorithm for optimal layout.

Examined and improved mathematical model of collaboration submersible centrifugal pump as the application package. This made it possible to determine the basic physical characteristics of the liquid, depending on the thermodynamic conditions. A verification of settlement and industry data. The discrepancy was not more than 8%. This enabled correctly and in a short time to determine the most efficient pump installation depth and achieve maximum possible efficiency at its joint work on a real fluid.

Keywords: submersible pump, impeller, guide vanes, computational fluid dynamics, water-oil emulsion, gas-liquid mixture, assertiveness, modified stage, cone assembly, mathematical model.

LIST OF PUBLICATIONS OF THE APPLICANT:

1. Shevchenko N.H. Kompleks prohrann dlia rascheta parametrov shtanhovoi skvazhynnoi nasosnoi ustanovky / N.H. Shevchenko, O.S. Koval, O.L. Shudryk // Visnyk NTU «KhPI». Serii: Enerhetychni ta teplotekhnichni protsesy y ustatkuvannia. – Kh.: NTU «KhPI», 2014. – № 1(1044). – S. 175-179.
2. Shevchenko N.H. Prohrannnyi modul prohnozuvannia hidrodynamichnykh kharakterystyk hazoridynnoi sumishi sverdlovyny pry mekhanizovanomu vydobutku nafty / N.H. Shevchenko, O.L. Shudryk // Visnyk NTU «KhPI». Serii: Matematychni modeliuvannia v tekhnitsi ta tekhnolohiiakh. – X.: NTU «KhPI». – 2014. – № 39(1082). – S. 190-197.
3. Shevchenko N.H. Kompleks prohrann dlia prohnozuvannia kharakterystyk roboty UEVN / N.H. Shevchenko, O.L. Shudryk, A.V. Mirzoian // Materialy IKh Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi studentskoi konferentsii mahistrantiv. – Kharkiv. – 2015. – S. 105–106.
4. Shudryk O.L. Chyselne prohnozuvannia intehralnykh kharakterystyk v stupeni zahlybnoho vidtsentrovoho nasosa EVN5-80 / O.L. Shudryk // XX

Mizhnarodna naukovo-tekhnichna konferentsiia «Hidroaeromekhanika v inzheneranii praktytsi». – K. : NTUU «KPI», 2015. – S. 141-142.

5. Shevchenko N.H. Chylennoe modelyrovanye potoka viazkoi zhydkosti v stupeny pohruzhnoho nasosa / N.H. Shevchenko, O.L. Shudryk // Visnyk NTU «KhPI». Serii: Hidravlichni mashyny ta hidroahrehaty. – Kh.: NTU «KhPI». – 2015. – №3(1112). – S. 59-67.

6. Shevchenko N.H. Osobennosti chylennoho modelyrovanyia techenyia viazkoi zhydkosti v kanalakh pohruzhnykh lopastnykh nasosov nyzkoi y srednei bystrokhodnosti / N.H. Shevchenko, O.L. Shudryk, L.R. Radchenko // Visnyk NTU «KhPI». Serii: Hidravlichni mashyny ta hidroahrehaty. – Kh.: NTU «KhPI». – 2015. – № 45 (1154). – S. 76-81.

7. Shevchenko N.H. K voprosu modelyrovanyia potoka viazkoi zhydkosti v stupeny pohruzhnoho tsentrobeznoho nasosa / N.H. Shevchenko, O.L. Shudryk // Informatsiini tekhnologii: nauka, tekhnika, tekhnolohiia, osvita, zdorovia: Tezy dopovidei KhXIII Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii «MicroCAD». – T. 1– Kh. : NTU «KhPI», 2015. – C. 303.

8. Shevchenko N.H. Yssledovanye techenyia hazozhydkostnoi smesy v protochnoi chasty stupeny pohruzhnoho nasosa dlia dobychy nefty / N.H. Shevchenko, A.L. Shudryk, E.Iu. Bondarenko // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Hydraulic machines and hydrounits. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2017. – No 22(1244). – P. 31–37.

9. Shudryk O.L. Modeliuvannia fizychnykh vlastyvostei hazoridynnoi sumishi u sverdlovyni / O.L. Shudryk // XII Mizhnarodnii naukovo-tekhnichnii konferentsii «Vъdeshchye yzsledvanyia». – Sofiia: «Bial-HRAD-BH» OOD, 2016. – S. 26-29.

10. Shudryk O.L. Doslidzhennia vplyvu umov ekspluatatsii zahlybnoho elektrovidtsentrovoho nasosa na yoho robochi kharakterystyky. / O.L. Shudryk // Mizhnarodna naukovo-tekhnichna konferentsiia «Mashyny, obladnannia i materialy dlia naroshchuvannia vitchyznianoho vydobutku ta dyversyfikatsii postachannia nafty i hazu» IIM – 2016. – Ivano-Frankivsk : IFNTUNH, 2016.

11. Shudryk A.L. Using open software application packages for simulation of viscous incompressible fluid / A. L. Shudryk// Bulletin of NTU "KhPI". Series: Hydraulic machines and hydrounits. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2016. – No 20 (1192). – P. 90–93.
12. Drankovskiy V. Э. К расчету протоchnыkh chastei vysokopapopныkh radyalno-oseвыkh obratымыkh hydromashyn / V. Э. Drankovskiy, M. Yu. Khavrenko, A. L. Shudryk // Visnyk NTU «KhPI». Serii: Matematychno modeliuвання v tekhnitsi ta tekhnolohiiakh. – Kh. : NTU «KhPI». – 2016. – № 16. – S. 31-36.
13. Shudryk A.L. Modelyrovanye multyfazныkh techeniy v pohruzhныkh tsentrobezhныkh nasosakh pry ekspluatatsyy neftiаныkh skvazhyn / A.L. Shudryk, N.H. Shevchenko // Mizhnarodna naukovо-tekhnichna konferentsiia «Udoskonalennia enerhustanovok metodamy matematychnoho i fizychnoho modeliuвання». – Kh. : IPMash NAN Ukrainy, 2017.
14. Shevchenko N.H. Udoskonalennia metodyky vyznachennia kharakterystyky vidtsentrovoho nasosa pry dobychi naftohazovoi produktsii / N.H. Shevchenko, O.L. Shudryk, D.V. Belmas // Materialy konferentsii XVIII Mizhnarodnoi naukovо-tekhnichnoi konferentsii AS PHP «Promyslova hidravlika i pnevmatyka». Sektsiia «Hidromashyny i hidropnevmoahrehaty». – Vinnytsia : VNTU, 2017. – S. 56.
15. Shevchenko N.H. Osobennosty rascheta kharakterystyky pohruzhnogo tsentrobezhnogo nasosa s uchetom yzmeneniya parametrov hazozhydkostnoi smesy vdol / N.H. Shevchenko, A.L. Shudryk, D.V. Belmas // Promyslova hidravlika i pnevmatyka. – Vinnytsia : VNAU, 2017. – №3(57). – S. 35-38.
16. 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 // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Hydraulic machines and hydrounits. – Kharkov : NTU "KhPI", 2017. – No. 42 (1264). – P. 51–55.

17. Patent na korysnu model' 116113 Ukrayina E21B 33/12. / Paker / Fyk I.M., Rymchuk D.V., Tsybul'ko S.V., Shevchenko N.H., Shudryk O.L.; zayavnyk i patentovlasnyk NTU «KhPI». – No. u201611438; zayavl. 11.11.2016; opubl. 10.05.2017, Byul. No. 9.

18. Patent na korysnu model' 117755 Ukrayina F04D 1/06. / Stupin' zahlybnoho nasosa / Shevchenko N. H., Drankovs'kyi V. E., Shudryk O. L., Ryezva K. S.; zayavnyk i patentovlasnyk NTU «KhPI». – No. u201700051; zayavl. 03.01.2017; opubl. 10.07.2017, Byul. No. 13.

19. Patent na korysnu model' 117761 Ukrayina E21B 33/00 E21B 33/08. / Paker / Fyk I.M., Rymchuk D.V., Tsybul'ko S.V., Vynnyk V.V., Shudryk O.L.; zayavnyk i patentovlasnyk NTU «KhPI». – No. u201700063; zayavl. 03.01.2017; opubl. 10.07.2017, Byul. No. 13.

20. Shudryk O.L. Komp'yuterna prohrama «Prohrama «Prohrama modelyuvannya sumisnoyi roboty zahlybnoho vidtsentrovoho nasosa (EVN) ta sverdlovyny pry vydobutku nafty» («PVT-Well-Pump») / N.H. Shevchenko, O.L. Shudryk // Svidotstvo pro reyestratsiyu avtors'koho prava na tvir No. 74077, Ukrayina. Data reyestratsiyi v Derzhavnyi sluzhbi intelektual'noyi vlasnosti 09.10.2017.

ЗМІСТ

	С.
УМОВНІ ПОЗНАЧЕННЯ	6
ВСТУП	8
РОЗДІЛ 1. АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД І АНАЛІЗ МЕТОДІВ МОДЕЛЮВАННЯ РОБОЧОГО ПРОЦЕСУ В ЛОПАТЕВИХ ГІДРОМАШИНАХ ДЛЯ РЕАЛЬНИХ УМОВ ЕКСПЛУАТАЦІЇ	13
1.1. Основні концепції розвитку енергомашинобудівної галузі в Україні	13
1.2. Сучасний стан математичного моделювання робочого процесу лопатевих гідромашин	15
1.3. Особливості експлуатації та конструкції заглибної електровідцентрової насосної установки	23
1.4. Аналіз експериментальних досліджень заглибних насосів для реальних умов експлуатації	29
1.5. Аналіз існуючих методик перерахунку характеристик заглибних насосів на реальні умови експлуатації	37
1.6. Аналіз особливостей експлуатації заглибних насосів Бугреватського родовища	41
1.7. Вибір напрямку досліджень і висновки по першому розділу	45
РОЗДІЛ 2. ЧИСЕЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТРИВИМІРНОГО ПОТОКУ В'ЯЗКОЇ НЬЮТОНІВСЬКОЇ І НЕНЬЮТОНІВСЬКОЇ РІДИНИ В СТУПЕНІ ЗАГЛИБНОГО НАСОСА	47
2.1. Особливості робочого процесу заглибних насосів	47

2.2. Постановка задачі та математичне моделювання гідродинаміки в'язкої ньютонівської рідини в ступені насосу	49
2.3. Чисельна реалізація математичної моделі ньютонівської рідини	52
2.3.1. Вибір пакета для розрахунку тривимірної течії в'язкої рідини	52
2.3.2. Вибір розрахункової області, сітки, граничних умов	53
2.4. Верифікація математичної моделі для ньютонівської рідини	57
2.5. Розрахунок в'язкої течії в проміжній ступені насоса	61
2.6. Розрахунок течії в'язкої неньютоновської рідини	67
2.6.1. Математична модель гідродинаміки в'язкої неньютонівської рідини	67
2.6.2. Верифікація математичної моделі неньютонівської рідини в циліндричній трубі	69
2.6.3. Результати розрахунку математичної моделі неньютонівської рідини в ступені	71
2.7. Узагальнені результати моделювання течії ньютонівської і неньютонівської рідини	73
2.8. Висновки по другому розділу	78
РОЗДІЛ 3. ЧИСЕЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕЧІЇ ГАЗОРІДИННОЇ СУМІШІ В ПРОТОЧНІЙ ЧАСТИНИ СТУПЕНІ ЗАГЛИБНОГО НАСОСУ	80
3.1. Чисельне моделювання двофазних потоків в ступені насосу	80
3.2. Чисельна реалізація математичної моделі газорідинної суміші	84

3.3. Візуалізація течії газорідинної суміші в ступені насосу	86
3.4. Верифікація математичної моделі газорідинної суміші	91
3.5. Узагальнені дані дослідження течії газорідинної суміші в ступені середньої швидкохідності	92
3.6. Врахування впливу зміни параметрів газорідинної суміші вздовж насоса	95
3.7. Висновки по третьому розділу	98
РОЗДІЛ 4. ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ РОБОТИ СТУПЕНІ ЗАГЛИБНОГО НАСОСУ ПРИ РОБОТІ НА РЕАЛЬНІЙ РІДИНІ	100
4.1. Шляхи підвищення ефективності заглибних насосів при перекачці реальної рідини	100
4.2. Основні дослідження і напрямки щодо вдосконалення проточних частин ступенів заглибних насосів	102
4.3. Шляхи вдосконалення проточних частин заглибних насосів з метою підвищення їх напористості	105
4.3.1. Вплив скосу вихідної кромки робочого колеса	105
4.3.2. Модифікація проточної частини робочої ступені	107
4.3.3. Напіввідкрите модифіковане колесо при відкачці газорідинних сумішей	111
4.4. Висновки по четвертому розділу	113
РОЗДІЛ 5. СПІЛЬНА РОБОТА НАСОСА І СВЕРДЛОВИНИ. ВИБІР ОПТИМАЛЬНОГО РЕЖИМУ	115
5.1. Математичне моделювання спільної роботи системи «свердловина-насос»	115
5.1.1. Загальні відомості	115
5.1.2. Математичне моделювання та основні етапи розрахунку	117

5.1.3. Математична модель течії рідинної продукції	120
5.2. Чисельна реалізація математичної моделі	123
5.3. Верифікація програмного модуля « <i>PVT-Well-Pump</i> »	127
5.4. Вплив конічної збірки на характеристики насоса	130
5.4.1. Загальні відомості	130
5.4.2. Результати розрахунку	131
5.5. Висновки по п'ятому розділу	134
ВИСНОВКИ	135
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	137
ДОДАТКИ	154