

Анотація

Паневник Д.О. Підвищення ефективності використання наддолотних струминних насосів. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії у галузі 13 - механічна інженерія за спеціальністю 133–галузеве машинобудування. – Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу МОН України, м. Івано-Франківськ, Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу України, Івано-Франківськ, 2020.

В світовій практиці будівництва свердловин підсилюється тенденція зростання об'єму бурових робіт в складних гірсько-геологічних та технологічних умовах, внаслідок чого зростають вимоги до бурового обладнання, яке не вимагає значних витрат на обслуговування і, зокрема, до свердловинних ежекційних систем. Створення зони низького тиску, зростання витрати промивальної рідини у насосно-циркуляційній системі привибійного контуру, використання піногенеруючих пристроїв, які потребують незначного обслуговування, визначає якісно новий рівень розвитку бурової техніки. В процесі аналізу історії розвитку ежекційних технологій встановлено співвідношення об'ємів технологічних процесів, що реалізуються з використанням свердловинних струминних насосів та піногенеруючих пристроїв: буріння – 19 %, освоєння та випробування – 41 %, експлуатація – 12 %, ремонт свердловин – 27,1 %. Невпинне зростання частки ежекційних технологій в процесах, що реалізують розробку нафтогазових родовищ свідчить про їх надійність, ефективність та світове значення і актуальність досліджень, спрямованих на їх вдосконалення.

Незважаючи на значний об'єм проведених досліджень, теоретичні питання роботи струминного насоса в свердловині вивчені недостатньо. Відсутність чітких уявлень про змішування потоків та механізм формування втрат напору в елементах насосно-циркуляційної ежекційної системи є причиною значної похибки прогнозування безрозмірних параметрів роботи струминного насоса в свердловині та недостатньої надійності їх використання. Низькі енергетичні показники, особливо за наявності кавітаційного режиму роботи та утворення

газорідинної суміші, зумовлюють необхідність проведення досліджень спрямованих на експлуатацію струминних насосів в області максимальних значень коефіцієнта корисної дії. На сьогоднішній день відсутні універсальні насосно-циркуляційні ежекційні системи, які забезпечують одночасне зниження тиску та зростання витрати на вибої в процесі буріння за мінімальних витрат на їх обслуговування. Необхідність розв'язку вищезгаданих задач визначає актуальність проведених досліджень.

На основі систематизації та узагальнення конструкцій основних схем свердловинних струминних насосів вперше проведено порівняльний аналіз їх ефективності, в процесі якого встановлено, що найбільше зростання показників буріння (механічна швидкість зростає на 37,7 %, а проходження долота – на 40,5 %) має місце при використанні нагнітально-всмоктувальних ежекційних систем, які у порівнянні з піногенеруючими пристроями, що створюють газорідинні суміші, дозволяють підвищити ефективність розкриття продуктивного горизонту. Це дозволило в подальшому прийняти даний тип ежекційної системи за основу при вдосконаленні існуючих схем використання свердловинних струминних насосів та оптимізації режиму їх роботи та обслуговування.

В процесі статистичного оцінювання досвіду практичного застосування свердловинних ежекційних систем встановлено, що найбільш поширена методика теоретичного визначення безрозмірного напору струминного насоса в діапазоні зміни основного геометричного параметра від 2,041 до 6,25 забезпечує середню похибку 13,6-29,3 %.

Однією з причин значної розбіжності експериментальних та теоретичних значень безрозмірного напору є недосконала методика визначення нерівномірності поля швидкостей в камері змішування струминного насоса в умовах змінної масової витрати та відстані до робочої насадки ежекційної системи.

Аналіз методик теоретичного визначення безрозмірних параметрів насосно-циркуляційної ежекційної системи нагнітального типу свідчить про недосконалість існуючого алгоритму розрахунку гідравлічних втрат в

промивальній системі долота розміщеній на ділянці змінного масового змішаного потоку струминного насоса. Невизначеність теоретичного встановлення гідродинамічних та безрозмірних параметрів газорідних сумішей в елементах насосно-циркуляційної ежекційної системи безпосередньо впливає на точність прогнозування режиму роботи, надійність струминного насоса та ефективність його застосування. Відсутність чітких уявлень про механізм формування гідравлічних втрат в елементах, розміщених на ділянці змішаного потоку струминного насоса, свідчить про необхідність проведення експериментальних досліджень насосно-циркуляційної ежекційної системи нагнітального типу, які можуть бути використані для побудови математичної моделі удосконаленого варіанта ежекційної схеми.

В процесі теоретичних досліджень розроблена математична та імітаційна модель зміни поля швидкостей потоків газорідних сумішей в камері змішування струминного насоса у вигляді зсувної течії змінної масової витрати та тиску з потенціальним ядром обмеженої області з рівномірним профілем поля швидкостей, ширина якої може приймати нульові значення. Залежно від орієнтації елементів в проточній частині струминного насоса можливі дві схеми входження робочого струменя змінної масової витрати та тиску в камеру змішування ежекційної системи. Якщо діаметр камери змішування перевищує діаметр робочого струменя відстань між робочою насадкою та камерою відновлення швидкостей може бути класифікована як докритична, а змішувані потоки мають тришарову структуру. Якщо діаметр робочого струменя перевищує діаметр камери змішування відстань між робочою насадкою та камерою відновлення поля швидкостей може бути класифікована як закритична, а змішувані потоки змінної масової витрати та тиску мають двошарову структуру. Прийнята модель поля швидкостей газорідних сумішей, таким чином, передбачає змінну структуру та масову витрату змішуваних потоків: тришарову для докритичних та двошарову – для закритичних відстаней між робочою насадкою і камерою змішування. В процесі оцінювання нерівномірності поля швидкостей застосовувались інтегральні методи аналізу змішування

осесиметричних турбулентних струменів змінної масової витрати і тиску та результати імітаційного моделювання. Робота струминного насоса в кавітаційному режимі здійснює додатковий вплив на характер розподілу гідродинамічних параметрів в його проточній частині. Кавітаційний режим роботи струминного апарата особливо небезпечний при використанні піногенеруючих пристроїв.

На відміну від відомих формул отримані рівняння для визначення коефіцієнтів нерівномірності поля швидкостей дозволяють додатково врахувати геометричні розміри та взаємну орієнтацію елементів струминного насоса і режим його роботи, що сприяє зближенню теоретичної та фактичної характеристики ежекційної системи, дозволяє оптимізувати робочий процес струминного насоса і підвищити його надійність та коефіцієнт корисної дії. Проведені дослідження узгоджуються з результатами числового експерименту і, зокрема, CFD моделювання.

Шляхом порівняльного аналізу встановлена недоцільність використання узагальненого коефіцієнта нерівномірності поля швидкостей в рівнянні характеристики струминного насоса. Підвищення точності теоретичного визначення гідродинамічних параметрів роботи ежекційної системи досягається використанням уособлених коефіцієнтів нерівномірності, що характеризують поле швидкостей окремо робочого та інжектваного (всмоктувального) потоків.

На основі висунутої автором та підтвердженої експериментально гіпотези про залежність гідравлічного опору елемента змішаного потоку газорідної суміші ежекційної системи від витрати робочого потоку та автономність по відношенню до витрати інжектваного (всмоктуваного) потоку розроблена методика визначення безрозмірних параметрів гідравлічної системи струминного насоса (із використанням методу електрогідродинамічної аналогії) за умови недопущення його роботи в кавітаційному режимі.

Експериментальне підтвердження проведених теоретичних досліджень включає чотири етапи:

1) Встановлена наявність залежності безрозмірних параметрів роботи струминного насоса від конструкції місцевого опору, розміщеного на ділянці змішаного потоку.

2) Доведена залежність параметрів роботи струминного насоса від витрати робочого потоку.

3) Визначений вплив витрати робочого та змішаного потоків на втрати напору в елементі, розміщеному на ділянці змішаного потоку.

4) Перевірена адекватність математичної моделі безрозмірної характеристики гідравлічної системи струминного насоса побудованої на основі вищезазначеної гіпотези.

В процесі досліджень проведений порівняльний аналіз експериментальної та теоретичної безрозмірної характеристики струминного насоса, рівняння якої містить оновлені величини коефіцієнтів нерівномірності поля швидкостей, отримані при математичному моделюванні процесу змішування потоків. З метою можливості перенесення результатів експериментальних досліджень на реальну конструкцію струминного насоса існуючий перелік безрозмірних комплексів, що визначають подібність робочих процесів, доповнено узагальненим критерієм Ейлера.

Для підвищення вірогідності результатів експериментальних досліджень при відсіюванні похибок вимірів, перевіріці нормальності закону розподілу і попередньої обробки отриманих результатів використовувались розрахунок максимальних відхилень, показники асиметрії і ексцесу, критерії Стюдента, Фішера, Пірсона та Колмогорова-Смирнова. При побудові функціональних залежностей застосовувалось параболічне інтерполювання Чебишева та класичний метод найменших квадратів.

Використовуючи розроблені математичні і імітаційні моделі та метод електрогідродинамічної аналогії досліджено вплив конструкторських та режимних безрозмірних параметрів (напір, витрата та коефіцієнт корисної дії) на зміну енергетичних показників та визначені геометричні розміри елементів і гідродинамічні характеристики ежекційної системи, які оптимізують режим

роботи та їх обслуговування, забезпечують максимальний напір, коефіцієнт корисної дії і ефективність струминного насоса та підвищують надійність його експлуатації.

На основі оптимізації гідравлічних зв'язків між елементами ежекційної системи та застосування методу електрогідродинамічної аналогії в роботі запропонований пристрій, який дозволяє в одній конструкції реалізувати переваги використання двох основних схем розміщення струминного насоса в свердловині та забезпечує максимальний напір та коефіцієнт корисної дії його використання. Зниження диференціального тиску та покращення умов виносу шлама з наддолотної області, що має місце у випадку використання нагнітально-всмоктувальної ежекційної системи, доповнено зростанням витрати потоку на вибої, що є основною перевагою застосування нагнітальних систем. Оптимізація характеру розподілу потоків газорідних сумішей в насосно-циркуляційній системі замкненого привибійного контуру циркуляції наддолотної ежекційної системи проведено із використанням методу електрогідродинамічної аналогії.

Наведене теоретичне обґрунтування необхідності спільного розгляду гідравлічних та міцнісних параметрів окремих елементів ежекційної системи, спрямоване на запобігання виникнення тріщин та наступного руйнування. Граничне навантаження на елементи струминного насоса та критичні напруження, які для запобігання виникнення тріщин необхідно враховувати при визначенні їх міцності, створюється при його роботі в кавітаційному режимі. Проведені дослідження дали змогу сформулювати принципи оцінки критичного напруженого стану під дією гідравлічного навантаження, вибору необхідної за умов міцності товщини корпусу свердловинного насоса та визначити імовірність появи тріщин в його елементах. Оцінка умов міцності та напруженого стану корпусу струминного насоса та імовірність появи тріщин в його елементах може здійснюватись для зовнішнього та внутрішнього розміщення робочої насадки. У випадку зовнішнього розміщення робочої насадки можливе виникнення напружень та поява тріщин викликана дією внутрішнього тиску. У випадку

внутрішнього розміщення робочої насадки можлива поява тріщин викликана дією зовнішнього тиску.

Для визначення очікуваного зростання показників буріння використовувались емпіричні залежності механічної швидкості поглиблення свердловини від зниження тиску та витрати на вибої, а також емпірична залежність для проходження долота. Встановлено, що запропонована ежекційна система порівняно із відомими конструкціями забезпечує зниження тиску та зростання витрати на вибої відповідно в 2,54 та 1,59 рази.

Результати проведених досліджень забезпечують підвищення ефективності використання та технічного обслуговування наддолотних струминних насосів у порівнянні з піногенеруючими пристроями аналогічного призначення шляхом реалізації наступних завдань:

- зростання точності теоретичного визначення безрозмірної характеристики струминного насоса до 20,1 % за рахунок удосконалення процесу оцінки нерівномірності поля швидкостей змішуваних потоків;
- удосконалення методики розрахунку безрозмірної характеристики гідравлічної системи струминного насоса з використанням методу електрогідродинамічної аналогії, що дозволило зменшити похибку її визначення на 10,9 %;
- обґрунтування методу вибору міцнісних параметрів корпусу струминного насоса на основі дослідження його напружено-деформованого стану в умовах дії гідравлічного навантаження при його роботі в кавітаційному режимі;
- розробки конструкції пристрою для буріння свердловин, який забезпечує підвищений коефіцієнт корисної дії, на основі паралельно-послідовного з'єднання нагнітальної та нагнітально-всмоктувальної ежекційної системи, що дає змогу підвищити механічну швидкість буріння на 24,4 % та проходження долота на 27,6 %.

Ключові слова: піногенеруючий пристрій; насос; обслуговування, надійність; ефективність, напруження; тріщина; математична модель; оптимізація; електрогідродинамічна аналогія; коефіцієнт корисної дії; міцність; насосно-циркуляційна система; всмоктувальна; кавітація; напір; витрата; змінний

масовий потік рідини; насадка; гідравлічна; струмінь; поле швидкостей, тиск, газорідинна суміш; безрозмірний параметр.

ABSTRACT

Panevnyk D.O. Improving the efficiency of using above-bit jet pumps. – Qualification scientific work as the manuscript.

Thesis for a Philosophy Degree in the field of 13 - Mechanical Engineering, Specialty 133 – Branch Mechanical Engineering – Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, Ministry of Education and Science of Ukraine, Ivano-Frankivsk, Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, Ukraine, Ivano-Frankivsk, 2020.

In the world practice of the well construction, the tendency of increasing the volume of drilling in complex mining, geological and technological conditions is growing, as a result requirements for drilling equipment that doesn't require significant maintenance cost and in particular for well ejection systems are expanding. Creation of a low pressure zone, increase in the flow of the flushing fluid in the pump-circulating system of the downhole contour, application of foamgenerating devices that require insignificant maintenance, determines a qualitatively new level of drilling equipment development. In the process of analyzing the history of ejection technologies development, the correlation of volumes of technological processes, implemented with the application of downhole jet pumps and foamgenerating devices: drilling – 19 %, completion and testing – 41 %, operation – 12 %, well repair – 27.1 % has been established. Continuous growth of the share of ejection technologies in processes that implement oil and gas fields development, testifies to their reliability, efficiency, global importance and relevance of the research aimed at their improvement.

Despite considerable amount of the conducted research, theoretical issues of the jet pump performance in the well haven't been studied enough. The lack of clear understanding about mixing of flows and formation mechanism of pressure loss in the elements of the pump-circulating ejection system is the reason for considerable error of prediction of dimensionless parameters of the jet pump performance in the well and not sufficient reliability of their use. Low energy indicators, especially in the presence of

cavitation performance and formation of gas and liquid mixture, cause the need for researches aimed at studying the jet pumps performance in the area of maximum values of total efficiency. Currently there are no universal pump-circulating ejection systems that provide simultaneous drop in pressure and increase in the flow at the bottomhole in the drilling process with minimal maintenance cost. The need to solve the above mentioned tasks determines the relevance of the conducted research.

Based on systematization and generalization of the design of basic diagrams of the downhole jet pumps, for the first time has been performed a comparative analysis of their efficiency, in the process of which it has been found out that the greatest increase in drilling performance (penetration speed increases by 37.7 %, and bit penetration – by 40.5 %) occurs by application of the injection-intaken ejection systems, which compared to foamgenerating devices that generate gas and liquid mixtures, allow to increase the efficiency of the pay horizon drilling in. This has further allowed to have this type of ejection system as the basic one by improving the existing schemes of using the downhole jet pumps and optimizing their performance and maintenance mode.

During the statistical evaluation of practical experience of the well ejection systems application it has been found that the most common method of theoretical determination of dimensionless pressure in the jet pump in the range of the main geometrical parameter variation from 2,041 to 6.25 gives an average error of 13.6 – 29.3 %.

One of the reasons for significant difference between experimental and theoretical values of dimensionless pressure is the imperfect method of determining the non-uniformity of the velocity field in the jet pump mixer in the conditions of variable mass flow and the distance to the operating nozzle of the ejection system.

Analysis of the methods for theoretical determination of dimensionless parameters of the pump-circulating system of injection type indicates the imperfection of the existing algorithm of the hydraulic loss calculation in the fluid circulating system of the bit located on the section of variable mass mixed fluid flow of the jet pump. Ambiguity of theoretical determination of hydrodynamic and dimensionless parameters of gas and liquid mixtures in the elements of the pump-circulating ejection system directly affects

the accuracy of predicting the performance mode, reliability of the jet pump and efficiency of its application. The lack of clear understanding of the formation mechanism of hydraulic loss in the elements located in the section of the jet pump mixed fluid flow, demonstrates the need for experimental studies of the pump-circulating system of injection type, which can be used to produce a mathematical model of the improved example of ejection scheme.

In the process of theoretical researches, mathematical and simulation model of changing the velocity field of gas and liquid mixtures flows in the mixer of the jet pump in the form of a shift flow of the variable mass flow and pressure with a potential core limited by the area with uniform profile of the velocity field, the width of which can have zero values, have been worked out. Depending on the orientation of the elements in the flow section of the jet pump there are two possible schemes of penetration of the operating jet of a variable mass flow and pressure into the mixer of the ejection system. If the diameter of the mixer exceeds the diameter of the operating jet, the distance between the operating nozzle and the mixture of velocity recovery can be classified as subcritical and the mixing fluid flows have a three-layer structure. If the diameter of the operating jet exceeds the diameter of the mixer, the distance between the operating nozzle and the mixture of velocity field recovery can be classified as postcritical and the mixing fluid flows of variable mass flow and pressure have a two-layer structure. The chosen model of the velocity field of gas and liquid mixtures, thus implies a variable structure and mass mixing fluid flows: three-layer for subcritical and two-layer – for postcritical distances between the operating nozzle and the mixer. In the process of evaluating the non-uniformity of the velocity field, integral methods to analyze mixing of axisymmetric turbulent jets of variable mass flow and pressure and simulation results have been applied. Cavitation performance of the jet pump provides additional impact on the character of hydrodynamic parameters distribution in its flow section. Cavitation performance of the jet pump is particularly dangerous during application of foamgenerating devices.

In contrast to the known formulas, the obtained equations for determining the coefficients of non-uniformity of the velocity field also allow to take into account

geometric dimensions and mutual orientation of the jet pump elements and its performance mode, that contributes to drawing together theoretical and actual characteristics of the ejection system, allows to optimize the jet pump performance process, increase its reliability and total efficiency. The conducted researches agree with the results of numerical experiment and, in particular, CFD modeling.

By means of comparative analysis, the nonexpediency of using the generalized coefficient of non-uniformity of the velocity field in the equation of jet pump characteristics has been determined. Improvement of the accuracy of theoretical determination of the hydrodynamic parameters of the ejection system performance is achieved by using individual coefficients of non-uniformity that characterize the velocity field of the operating and injected (intaken) flows separately.

On the basis of the put forward by the author and confirmed experimentally hypothesis about dependence of hydraulic resistance of the element of the mixed flow of gas and liquid mixture of the ejection system from the operating flow and automodelity in relation to the injected (intaken) flow, the method for determining the dimensionless parameters of the jet pump hydraulic system (applying the method of electrohydrodynamic analogy) in the conditions of preventing its cavitation performance has been developed.

Experimental confirmation of the conducted theoretical researches includes four steps:

1) Dependency of dimensionless parameters of the jet pump performance from the design of the local resistance structures located on the section of the mixed fluid flow, has been found to exist.

2) Dependency of parameters of the jet pump performance from the operating flow has been proved.

3) Influence of the operating and mixed fluid flows on pressure loss in the element located on the section of the mixed fluid flow has been determined.

4) Adequacy of the mathematical model of dimensionless characteristics of the jet pump hydraulic system, built on the basis of the above mentioned hypothesis has been checked.

During the research, the comparative analysis of experimental and theoretical dimensionless characteristics of the jet pump, the equation of which contains the updated values of non-uniformity coefficients of the velocity field, obtained by mathematical modeling of the fluid flows mixing process has been conducted. With an aim of possible application of experimental results in practical design of the jet pump, the existing list of dimensionless constructions, which determine similarity of operating processes, has been complemented by the generalized Euler's criterion.

For improving the reliability of experimental research data by selection of measurement errors, testing the normality of the law of distribution and pre-processing of the obtained results, the calculation of maximum deviations, the values of asymmetry and kurtosis, the criteria of Student, Fisher, Pearson and Kolmogorov-Smirnov have been applied. During construction of functional dependencies, Chebyshev parabolic interpolation and classical method of least squares have been used.

Applying the developed mathematical and simulation models and the electrohydrodynamic analogy method, the influence of design and mode dimensionless parameters (pressure, flow and total efficiency) on the change of energy indicators has been examined, geometrical dimensions of the elements and hydrodynamic characteristics of the ejection system that optimize performance and maintenance mode, provide maximum pressure, total efficiency, efficiency of the jet pump and increase the reliability of its performance have been determined.

Based on optimization of hydraulic connections between elements of the ejection system and application of the electrohydrodynamic analogy method, the device, which allows to realize in a single design advantages of using the two main schemes of the jet pump placement in the well and provides maximum pressure and total efficiency of its application has been introduced in the paper. Drop in differential pressure and improvement of conditions for the sludge removal from the above-bit section, as in the case of using the injection-intaken ejection system, has been supplemented by increase in the flow at the bottomhole, that constitutes the main advantage of the injection systems using. Optimization of the nature of distribution of gas and liquid mixtures flows in the pump-circulating system of closed bottomhole contour of the above-bit

ejection system circulation has been achieved applying the method of electrohydrodynamic analogy.

Theoretical justification of the need for joint consideration of the hydraulic and strength parameters of the ejection system individual elements aimed at preventing the occurrence of cracks and further destruction has been provided. The ultimate load on the elements of the jet pump and ultimate tensions, which should be taken into consideration when determining their strength in order to prevent occurrence of cracks, is created during its cavitation performance. The conducted researches made it possible to formulate the principles for evaluation of the ultimate tension state under the action of hydraulic load, choice of the required thickness of the downhole pump barrel at the conditions of strength and to determine the probability of cracks occurrence in its elements. Evaluation of strength conditions and tension state of the jet pump barrel and the probability of cracks occurrence in its elements can be carried out for external and internal placement of the operating nozzle. In the case of external placement of the operating nozzle, the occurrence of tension and cracks caused by internal pressure is possible. In the case of internal placement of the operating nozzle, occurrence of cracks caused by the action of external pressure is possible.

To determine the expected growth of the drilling performance, the empirical dependences of the penetration speed of the well deepening from the pressure drop and flow decrease at the bottomhole, and also empirical dependence for the bit penetration have been used. It has been found that the presented ejection system compared with the known constructions provides pressure drop and flow increase at the bottomhole, in 2.54 and 1.59 times respectively.

The results of the conducted research provide increase in the efficiency of using and maintenance of the above-bit jet pumps in comparison with foamgenerating devices of similar function by implementing the following tasks:

- increase of the accuracy of theoretical determination of dimensionless characteristics of the jet pump to 20.1 % by improving the process of estimating the non-uniformity of velocity field of the mixed flows;

– improvement of the method of calculating the dimensionless characteristics of the jet pump hydraulic system applying the method of electrohydrodynamic analogy, that allowed to reduce the error of its determination by 10.9 %;

– substantiation of the method of choosing the strength parameters of the jet pump barrel based on the study of its tension-strain state in the conditions of hydraulic load during its cavitation performance;

– development of the design of the device for drilling wells, which provides increased total efficiency, based on parallel and in serial connection of injection and injection-intaken ejection system, which allows to increase the penetration speed by 24.4 % and the bit penetration by 27.6 %.

Keywords: foamgenerating device, pump, maintenance, reliability, efficiency, tension, crack, mathematical model, optimization, electrohydrodynamic analogy, total efficiency, strength, pump-circulating system, intaken, cavitation, pressure, flow, variable mass fluid flow, nozzle, hydraulic, jet, velocity fields, gas and liquid mixture, dimensionless parameter.

Список публікацій здобувача

1. Величкович А.С., Паневник Д.О. Обґрунтування вибору геометричних розмірів свердловинного струминного насоса. *Нафтогазова галузь України*. 2013. № 6. С.20–23.
2. Паневник Д.О. Дослідження впливу температурного фактора на характеристику струминного насоса. *Науковий вісник Івано–Франківського національного технічного університету нафти і газу*. 2015. №2(39). С.111–114.
3. Паневник Д.А., Величкович А.С. Оценка напряженного состояния корпуса наддолотного гидроэлеватора. *Нефтяное хозяйство*. 2017. № 1. С.70–73. **(Scopus)**.
4. Паневник Д.О. Обґрунтування методу вибору параметрів експлуатації пристрою для ліквідації прихоплень бурильної колони. *Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ*. 2017. № 3. С. 137–143.
5. Velychkovych A.S., Panevnyk D.O. Study of the stress state of the downhole jet pump housing. *Науковий вісник НГУ*. 2017. № 5. Р.50–55. **(Scopus)**.
6. Паневник Д.О. Систематизація конструкцій свердловинних струминних насосів. *Молодий вчений*. 2017. № 8(48). С. 399–406. **(Index Copernicus)**.
7. Крижанівський Є.І., Паневник Д.О. Аналіз тенденцій розвитку ежекційних нафтогазових технологій. *Молодий вчений*. 2018. № 10(62). С.267–271. **(Index Copernicus)**.
8. Kryzhanivskiy Ye.I., Panevnyk D.O. The study on the flows kinematics in the jet pump's mixing chamber. *Науковий вісник НГУ*. 2019. № 1. С.62–68. **(Scopus)**.
9. Крыжанивский Е.И., Паневник Д.А. Экспериментальное исследование скважинного струйного насоса. *Наука I Studia. Nowoczesne Technologie Informacyjne (Przemysl, Poland)*. 2019. № 5 (194). Р.30–40.
10. Крижанівський Є.І., Паневник Д.О. Моделювання робочого процесу наддолотного струминного насоса. *Нафтогазова галузь України*. 2019. № 6. С.7–10.
11. Kryzhanivskiy Ye. I., Panevnyk D.O. Experimental investigation of the near-bit jet pump. *Oil and gas exploration and production*. 2019. Vol.6. Issue 2. Р.35–40.

12. Крижанівський Є.І., Паневник Д.О. Оптимізація конструкційних та режимних параметрів свердловинної ежекційної системи. *Нафтогазова енергетика*. 2020. № 2. С. 73–80.

13. Крижанівський Є.І., Паневник Д.О. Підвищення ефективності експериментальних досліджень свердловинного струминного насоса. *Методи та прилади контролю якості*. 2020. № 1(44). С. 16–23.

14. Крижанівський Є.І., Паневник Д.О. Удосконалення математичної моделі робочого процесу свердловинних ежекційних систем. *Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ*. 2020. № 1(74). С.36-44.

15. Крыжанивский Е.И., Паневник Д.А. Повышение эффективности использования наддотных струйных насосов. *Socar Proceeding*. 2020. № 2. С. 112–118. **(Scopus)**.

16. Пристрій для буріння свердловин: пат. 115504 Україна: МПК (2016.01) E 21B 10/18. № 201607848; заявл. 15.07.16; опубл. 10.11.17, Бюл. № 21. 4с.

17. Величкович А.С., Паневник Д.О. Дослідження напружено–деформованого стану корпусу гідравлічного пристрою для буріння свердловин. *Сучасні технології у промисловому виробництві*: матеріали III всеукр. міжвузівської наук.–техн. конф. (м.Суми, 22–25 квітня 2014р.). Суми, 2014. С.131–132.

18. Паневник Д.О. Вплив температури змішуваних потоків на режим роботи свердловинної ежекційної системи. *Нафтогазова енергетика - 2017*: матеріали 6 міжнар. наук.–техн. конф. (м.Івано-Франківськ, 15–19 травня 2017 р.). Івано–Франківськ, 2017. С.336–338.

19. Паневник Д.О. Дослідження характеру розподілу потоків в гідравлічній системі свердловинного струминного насоса *АС ПГП Промислова гідравліка і пневматика*: матеріали XVIII міжнар. наук.–техн. конф. (м.Вінниця, 4 – 5 жовтня 2017 р.). Вінниця, 2017. С. 41–42.

20. Крижанівський Є.І., Паневник Д.О. Математична модель робочого процесу струминного насоса. *Інформаційні технології в металургії та*

машинобудуванні: матеріали міжнар. наук.–техн. конф. (м.Дніпро, 27-29 березня 2018 р.). Дніпро, 2018. С. 76.

21. Крижанівський Є.І., Паневник Д.О. Математична модель робочого процесу пристрою для ліквідації прихоплення бурильної колони. *Нафта і газ. Наука-освіта-виробництво: шляхи інтеграції та інноваційного розвитку*: всеукр. наук.–техн. конф. (м.Дрогобич, 18-19 квітня 2018 р.). Дрогобич, 2018. С. 71–74.

22. Крижанівський Є.І., Паневник Д.О. Класифікація свердловинних ежекційних систем. *Машини, обладнання і матеріали для нарощування вітчизняного видобутку нафти і газу PCE-2018*: матеріали II міжнар. наук.–техн. конф. (м.Івано-Франківськ, 24-27 квітня 2018 р.). Івано-Франківськ, 2018. С. 121–125.

23. Крижанівський Є.І., Паневник Д.О. Визначення характеристики гідравлічної системи наддотного струминного насоса. *АС ППП Промислова гідравліка і пневматика*: матеріали XIX міжнар. наук.–техн.конф. (м.Львів, 25-28 вересня 2018.). Львів, 2018. С.35.

24. Крижанівський Є.І., Паневник Д.О. Імітаційне моделювання робочого процесу свердловинного струминного насоса. *Прогресивні технології у машинобудуванні*: матеріали VIII міжнар. наук.–техн. конф. (м.Івано-Франківськ, 4-8 лютого 2019 р.). Івано-Франківськ, 2019. С.185–186.

25. Паневник Д.О. Оптимізація розподілу потоків в гідравлічній системі пристрою для буріння свердловин. *Інформаційні технології в моделюванні*: матеріали IV всеукраїнської науково–практичної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених (м.Миколаїв, 21-22 березня 2019 р.). Івано-Франківськ, 2019. С.5–6.

26. Паневник Д.О. Використання числового моделювання для оптимізації конструкції свердловинного струминного насоса. *Інформаційні технології в металургії та машинобудуванні*: матеріали міжнар. наук.–техн. конф. (м. Дніпро, 26-28 березня 2019 р.). Дніпро, 2019. С. 104.

27. Паневник Д.О. Застосування CFD-моделювання для визначення кінематичних параметрів потоків в камері змішування струминного насоса.

Інформаційні технології в освіті, техніці, промисловості: матеріали IV всеукр. наук.–практ. конф. молодих учених і студентів (м.Івано-Франківськ, 10-11 жовтня 2019 р.). Івано-Франківськ, 2019. С.183–185.

28. Крижанівський Є.І., Паневник Д.О.Застосування програмного комплексу ANSYS для моделювання розподілу потоків в процесі роботи струминного насоса. *Прикладна геометрія та інформаційні технології в моделюванні об'єктів, явищ і процесів AGIT-2019*: матеріали IV всеукр. наук.–практ. конф. (м. Миколаїв, 16-18 жовтня 2019 р.). Миколаїв, 2019. С.22.

29. Паневник Д.О. Математична модель напірної характеристики струминного насоса //Матеріали V Всеукраїнської науково-практичної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених «Інформаційні технології в моделюванні ІТМ-2020» м.Одеса, 19-20 березня 2020 р.: Одеський національний політехнічний університет. С.74-76.