

УДК 621.891+621.694.2

DOI: 10.18372/0370-2197.4(93).16284

*Д. О. ПАНЕВНИК**Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, Україна***МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ГІДРОАБРАЗИВНОЇ ЕРОЗІЇ ЕЛЕМЕНТІВ СВЕРДЛОВИННОГО СТРУМИННОГО НАСОСА**

Надійність свердловинних ежекційних систем суттєво залежить від точності прогнозування та ефективності запобігання виникненню гідроабразивної ерозії в проточній частині струминного насоса. При моделюванні процесу зношування струминного насоса використано новітній метод формування робочої сітки його проточної частини шляхом ініціалізації мозаїчної технології, що дозволило скоротити витрати часу на розрахунок та збільшити точність моделювання процесів пов'язаних з імітацією ерозії у свердловинному струминному насосі. Встановлено характер зміни геометричної моделі проточної частини струминного насоса під дією гідроабразивної ерозії. Проаналізовано здеформовану геометрію сегментів робочої насадки та камери змішування, яка утворилась внаслідок тривалого впливу абразивних часток транспортovаних робочим та інжектованим потоком. Представлена модель траєкторії руху твердих частинок абразиву в об'ємі рідини струминного насоса, яка дозволила визначити швидкість утворення концентраторів ерозійного впливу в його проточній частині.

Ключові слова: струминний насос, гідроабразивна ерозія, числове моделювання, параметричне моделювання, тривимірна сіткова модель, змінна геометрія сітки, моделі турбулентності.

Вступ. В умовах зростання потреби споживання вуглеводнів спостерігається тенденція збільшення частки використання ежекційних технологій у сферах буріння [1] та експлуатації [2] свердловин, що свідчить про їх високу ефективність. Водночас при збільшенні попиту на ежекційні технології різко зросли вимоги до надійності використовованого обладнання внаслідок ускладнення умов його експлуатації. Одним з найбільш поширених факторів впливу на безвідмовність роботи струминного насоса є ерозія металу внаслідок наявності твердих частинок в змішуваних потоках.

З метою підвищення надійності установки свердловинної ежекційної системи, запобігання виникненню гідродинамічної ерозії потребує глибокого вивчення гідродинамічних процесів змішування потоків, їх статичних та динамічних характеристик. Дана обставина свідчить про актуальність досліджень спрямованих на протидію процесам гідродинамічної ерозії в проточній частині струминного насоса.

Гідродинамічне моделювання струминного насоса з використанням числових методів оптимізації є одним з найпоширеніших методів аналізу [3-4] для отримання оптимальних режимів роботи ежекційної системи. Використання прикладних CAD-програм до складу яких входять SolidWork [5] та ANSYS [6-7] суттєво скоротило витрати часу на проведення чисельного аналізу роботи ежектора. Дослідження розподілу потоків в проточній частині струминного насоса [8] та інтенсивності розподілу ерозії [9] дозволили оптимізувати геометричні параметри струминних насосів що збільшило рентабельність їх використання у свердловині.

Проте значна кількість досліджень присвячених моделюванню гідродинамічної ерозії проточної частини струминного насоса, з недостатньою точністю відображає реальний характер зміни геометрії в процесі зношування через використання статичної розрахункової моделі. При цьому форма ежектора не зважаючи

на вплив ерозійних часток залишається незмінною. Дана обставина нівелює вплив ерозії на геометричну модель проточної частини струминного насоса та не враховує змінний характер процесу зношування упродовж досліджуваного періоду експлуатації свердловинної ежекційної системи.

Постановка завдання досліджень. Метою даної роботи є імітаційне моделювання ерозійних процесів в проточній частині свердловинного струминного насоса із врахуванням нерівномірного характеру гідроабразивного зношування його проточної частини на основі використання динамічної сіткової моделі із автоматично змінюваною геометрією та структурою.

Вклад основного матеріалу досліджень. Аналіз процесів ерозії, які проходять в струминному насосі при роботі в свердловині, здійснювався з використанням програмного комплексу ANSYS, який дозволяє проводити гідродинамічні розрахунки три- та двовимірних моделей включаючи процеси гідродинамічної ерозії металів. Для проведення аналізу розподілу швидкостей за основу була взята тривимірна модель внутрішнього простору струминного насоса, який реально застосовується при реалізації процесів нафтогазовидобутку (рис. 1). Оскільки ерозія металу є стохастичним процесом, який потребує значного покращення сітки моделі, для отримання достовірних результатів було застосовано метод віртуальної топології. Даний метод дозволяє поділити тривимірну модель на зв'язані сегменти, що призводить до якісного збільшення кількості елементів та підвищення точності розрахунку моделі за незначного збільшенні його тривалості. Для реалізації методу віртуальної топології було використано внутрішній моделер програмного комплексу ANSYS (DESIGN MODELER), в якому області насадки та камери змішування поділено на окремі сегменти.

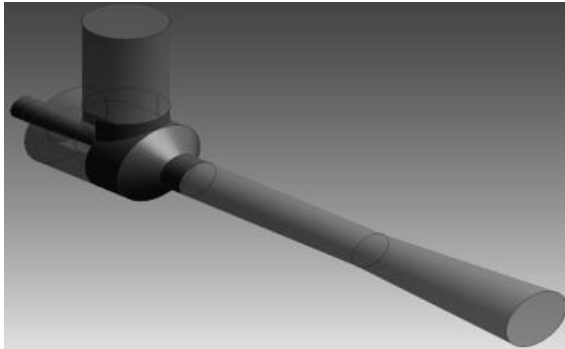


Рис. 1. Геометрія внутрішнього простору струминного насоса створена в редакторі DESIGN MODELER

Ключовим процесом моделювання, який впливає на точність розрахунку, є створення якісної сітки моделі, для побудови якої було використано передову технологію розроблену компанією ANSYS– MOSAIC Meshing. Технологія мозаїчної сітки забезпечує багатогранні зв'язки між різними типами сіток що прискорює процес її створення шляхом зменшення кількості граней та збільшення кількості елементів.

Побудова мозаїчної сітки здійснювалась з використанням модуля ANSYS FLUENT Meshing який є параметричним, з можливістю налаштування елементів геометрії та аналізом показників якості сіткової моделі (рис. 2).

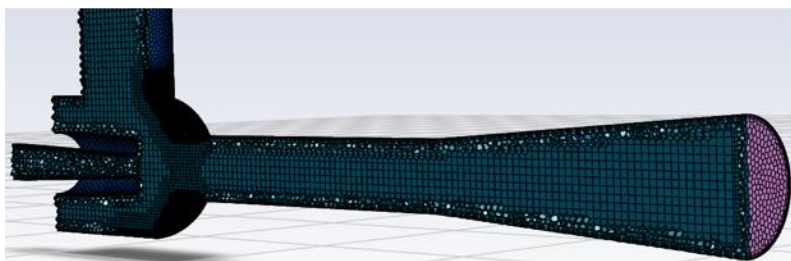


Рис. 2. Сіткова модель внутрішнього простору струминного насоса

Кількість елементів сітки складає – 985623, з яких близько 54 % припадають на області аналізу впливу гідродинамічної ерозії.

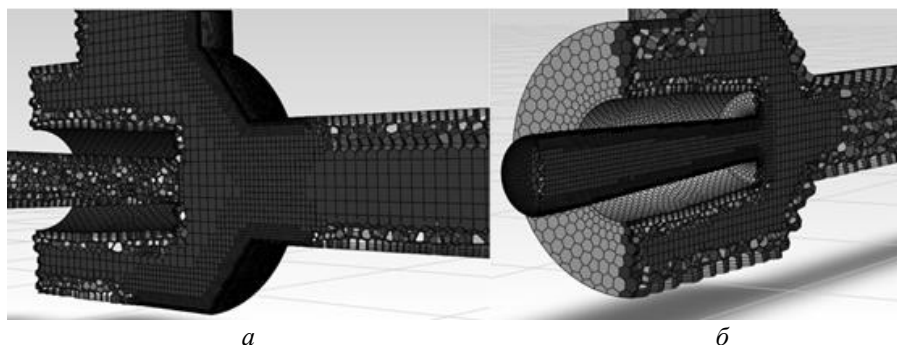


Рис. 3. Сіткова модель внутрішнього простору струминного насоса з покращенням сітки в області позиції: *a* – камери об'єднання потоків; *б* – насадки

Розмір елементів сітки становить: 0,1 мм для найменшого сегменту в області насадки та камери об'єднання потоків та 5 мм для найбільших елементів сітки, які використовуються в області дифузора для зменшення часу розрахунку та оптимізації моделі.

ANSYS–MOSAIC Meshing та методу віртуальної топології дозволяє суттєво підвищити швидкість та якість розрахунку ерозії яка проходить на вказаних поверхнях, внаслідок різкого збільшення кількості елементів та оптимізації зв'язків між ними (рис. 3).

Постановка задачі розрахунку, що є наступним кроком аналізу ерозійного впливу, здійснювалась з використанням модуля ANSYS–FLUENT, який володіє широкими можливостями гідравлічного моделювання, необхідними для моделювання руху потоку, його турбулентності, передачі реакцій. Даний модуль інтегрований у версію ANSYS Workbench, що надає можливості передачі інформації між усіма основними системами автоматичного проектування (САПР). Для постановки задачі використовувались наступні умови моделі турбулентності:

- модель k -epsilon-realisable, яка є оптимальною для моделювання характеристик потоку для турбулентного режиму;

- додатково обрані моделі поведінки пристінних потоків: Standard wall functions, які найбільш широко використовуються при моделюванні промислових установок;

- тип рідини моделі: Water;

- матеріал стінок: Stel (сталь з густиною 7900 кг/м^3);

- матеріал твердих частинок які надходять з потоком рідини: Sand (пісок з густиною 1400 кг/м^3 та середнім діаметром піщинки 0.5 мм).

Граничні умови моделі були обмежені представленими показниками:

Mas flow inlet – масова витрата робочого потоку (20 л/с) на вході в робочу насадку та інжектваного потоку (10 л/с) на вході в камеру об'єднання потоків, коефіцієнт інжекції $i = 0,5$;

Pressure outlet - тиск на виході з дифузора (35,4 МПа);

Шорсткість матеріалу стінок – 0,0001 м.

Для отримання додаткової умови тиску шляхом переформатування рівняння безперервності потоку були прийняті схеми обрахунку «Coupled». В умові просторової дискретизації були обрані рівняння другого порядку для тиску, визначення моменту та кінетичної енергії. Додатково було використано функцію «Pseudo transient», яка дозволяє збільшити імовірність знаходження розв'язання поставленої задачі шляхом поступового наближення та використовується лише для стаціонарного моделювання з розв'язувачем задач заснованим на використанні величини тиску.

Для знаходження рішення використано 1500 ітерацій без врахування додаткових ітерацій, які застосовувались для проведення розрахунку гідродинамічної ерозії стінки.

Для проведення імітації ерозійного зношування стінки сопла та камери об'єднання потоків було використано модуль Discrete phase model з наступними параметрами:

- тип дискретної фази: Sand (пісок);
- витрата дискретної фази через площину входу робочого та інжектваного потоку становила 5 % по відношенню до загальної витрати.

Траєкторії частинок побудовані з використанням функції «Particle tracking» та представлені на рис. 4.

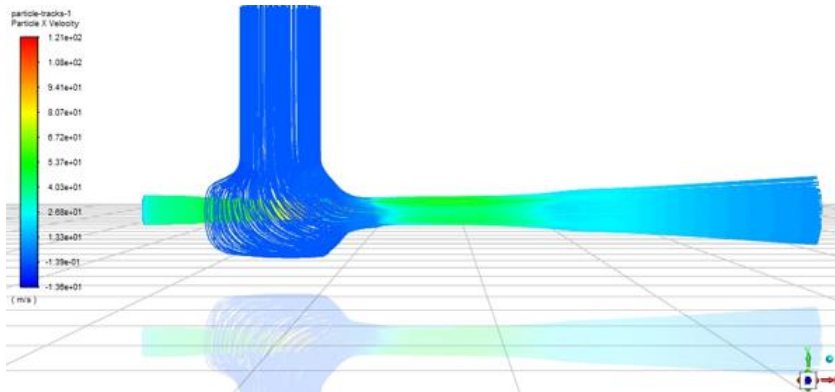


Рис. 4. Аналіз траєкторій та швидкості руху частинок

Додатково використано функцію «Erosion Dynamic Mesh», яка автоматично перебудовує геометрію під час кожного прорахунку впливу ерозії на стінку моделі, що дозволяє отримати реалістичні показники імітації ерозійного впливу протягом 24 годин.

Отримання результатів параметричного моделювання проходило з використанням програмного модуля Results, який дозволяє графічно відобразити результати моделювання та дає змогу відобразити контурні лінії або профілі, накладені на фізичну область. Результати ерозійного впливу на сегмент камери об'єднання потоків представлені з використанням функції «Contour» (Діаграми профілю), яка для побудови поверхневої графічної залежності відображає контури,

спроєктовані з поверхні вздовж опорного вектору, на величину, пропорційну значенню деформації геометрії в кожній точці поверхні (рис. 5).

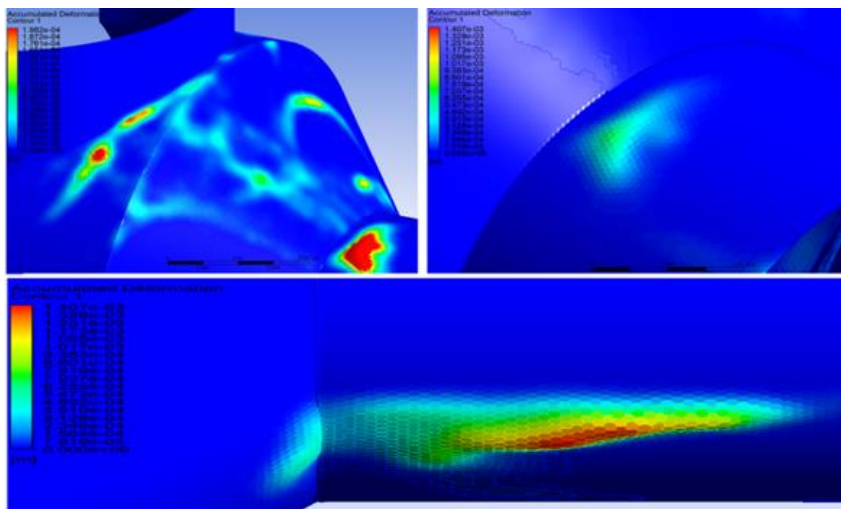
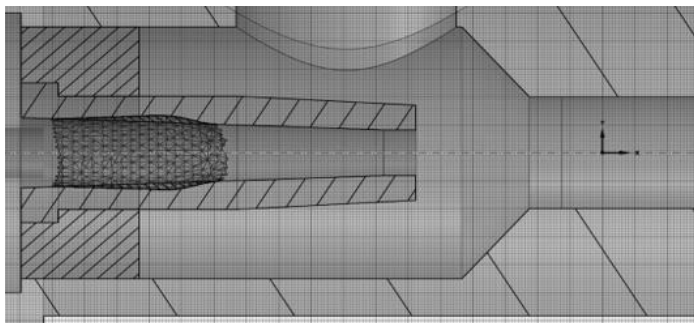


Рис. 5. Деформація геометрії камери об'єднання потоків внаслідок ерозійного впливу

Для аналізу впливу гідродинамічної ерозії на робочу насадку проведено перенесення тривимірної здеформованої моделі з модуля Results у внутрішній редактор для прямого геометричного моделювання ANSYS Space Claim, використання якого дозволяє аналізувати та оптимізувати геометрію на різних етапах проектування. Шляхом накладання перенесеної STL геометрії на тривимірну модель струминного насоса отримано профіль робочої насадки змінений під впливом ерозійного зношування (рис. 6).

Рис.6. Здеформований профіль робочої насадки виконаний в редакторі Space Claim



Використання програмного комплексу ANSYS і методів оптимізації призведе до збільшення часу безвідмовної роботи виробів нафтогазового обладнання шляхом аналізу стохастичних процесів які впливають на початкову геометрію. При подальшому удосконаленні отримана система зможе розв'язувати багатокритеріальні задачі, включаючи безліч параметрів геометричної оптимізації з врахуванням значної кількості шкідливих явищ, які мають місце при роботі нафтогазопромислового обладнання.

Висновки

1. Побудовані траєкторії руху твердих частинок в проточній частині струминного насоса, та отримано профіль робочої насадки із врахуванням деформації викликаній впливом абразивних компонентів робочої рідини.

2. Удосконалено аналітичну модель впливу гідроабразивного зношування проточної частини струминного насоса шляхом використання технології автоматичної перебудови сітки з врахуванням впливу zdeформованої геометрії на траєкторії потоку рідини. Використання нового методу побудови сіткової моделі дозволило отримати підвищену точність результатів та знизити витрати часу на розрахунок використанням зменшеної кількості граней та ефективної паралельної масштабованості.

3. Проаналізовано розподіл ерозійного впливу на проточну частину камери об'єднання потоків та виявлені осередки інтенсивного ерозійного зношування. Це дозволило визначити місця встановлення додаткових елементів захисту протидії гідроабразивній ерозії.

Завданням подальших досліджень є аналіз впливу вихрових потоків на характер проходження ерозії в проточній частині струминного насоса.

Список літератури

1. Мельников А.П. Исследование влияния эксцентрического и углового смещения рабочей насадки струйного насоса на его работу при бурении скважин / А.П.Мельников, Н.А.Буглов // Вестник ИрГТУ. – 2016. – № 6. – С. 50–57. DOI: 10.21285/1814-3520-2016-6-50-57.

2. Паневник А.В., Исследование влияния эксплуатационных факторов на износ элементов скважинных струйных насосов / А.В.Паневник, Д.А.Паневник // «Молодой ученый». – 2018. – № 11 (63). – С.377–381.

3. Zhao H. A PIV Experiment of Water Jet Through a Single Nozzle at Bottom Hole / H. Zhao, Z. Huang, H. Shi, Z. Chen, Z. Gu, F. Gao // Proceedings of the 48th National Conference on Fluid Mechanics and Fluid Power (FMFP), December 27-29, 2021, BITS Pilani, Pilani Campus, RJ, India. Easy Chair Preprint № 6570. 7 p. <https://easychair.org/publications/preprint/WP1Q>.

4. Meakhail T.A. A Study of the Effect of Nozzle Spacing and Driving Pressure on the Water Jet Pump Performance / T.A. Meakhail, I.R. Teaima // International Journal of Engineering Science and Innovative Technology (IJESIT). – 2013. – Volume 2. – Issue 5. – P. 373 – 382. <https://www.ijesit.com> › IJESIT201305_51.

5. Бутенко А.Г. Повышение эффективности струйного насоса при малых коэффициентах эжекции / А.Г.Бутенко, С.Ю. Смык // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. – 2015. – № 2. – С. 80-87. <http://dSPACE.opu.ua/jspui/handle/123456789/8886>.

6. Nedelcuț F. ANSYS flowizard used to optimize an water ejector / F. Nedelcuț, N. Iacob, C.Cuciuc // Journal of Industrial Design and Engineering Graphics. – 2012. – Volume 7. – Issue 2. – P. 19–22.

<https://www.researchgate.net/publication/308349408>.

7. Уразаков К.Р. Моделирование характеристик струйного насоса / К.Р. Уразаков, И.А. Мухин, Р.И. Вахитова // Электротехнические и информационные комплексы и системы. – 2015. – № 4. – Т. 11. – С. 41–50. <https://cyberleninka.ru>.

8. Чабурко П.С. Численное моделирование течения жидкости в струйном насосе / П.С. Чабурко, В.О. Ломакин // Russian Internet Journal of Industrial Engineering. – 2014. – Vol. 2. – no. 3. С. 55–58. <http://www.indust-engineering.ru>.

9. Song X.-G. Performance comparison and erosion prediction of jet pumps by using a numerical method / X.-G. S. Song, J.-H. Park, S.-G. Kim, Y.-C. Park // Mathematical and Computer Modelling. – 2013. – № 57. – P. 245 – 253. <http://dx.doi.org/10.1016/j.mcm.2011.06.040>.

Стаття надійшла до редакції 07.12.2021.

Паневник Денис Олександрович – д-р філософії (PhD), доцент кафедри нафтогазових машин та обладнання, Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, вул. Карпатська, 15, м. Івано-Франківськ, Україна, 76000, тел.: (095) 062 83 81, E-mail: den.panevnik@gmail.com.

D. A. PANEVNYK

SIMULATION OF HYDROABRASIVE EROSION PROCESS ELEMENTS OF A DOWNHOLE JET PUMP

The reliability of downhole ejection systems significantly depends on the accuracy of forecasting and the effectiveness of preventing the occurrence of hydroabrasive erosion in the flow part of the jet pump. The latest method of forming the working grid of its flowing part by initializing mosaic technology was used to model the process of wear of the jet pump, which allowed to reduce the time spent on calculation and increase the accuracy of modeling processes related to erosion simulation in the downhole jet pump. The nature of the change of the geometric model of the flow part of the jet pump under the action of hydroabrasive erosion is established. The deformed geometry of the segments of the working nozzle and the mixing chamber, which was formed as a result of prolonged exposure to abrasive particles transported by the working and injected flow, is analyzed. The model of the trajectory of the abrasive solid particles in the volume of the jet pump fluid is presented, which allowed to determine the rate of formation of concentrators of erosion influence in its flowing part.

Keywords: jet pump, hydroabrasive erosion, numerical modeling, parametric modeling, three-dimensional grid model, variable grid geometry, turbulence models.

References

1. Melnikov A.P. Studying the influence of working nozzle eccentric and angular misalignment in the jet pump on its operation at drilling well / A.P.Melnikov, N.A. Buglov // Proceedings of Irkutsk State Technical University. – 2016. – no. 6 P. 50–57. DOI: 10.21285/1814-3520-2016-6-50-57.
2. Panevnyk A.V. Study of the influence operational factors on the wear and tear items downhole jet pumps / A.V. Panevnyk, D.A. Panevnyk // Young Scientist. – 2018. – № 11 (63). – P.377–388.
3. Zhao H. A PIV Experiment of Water Jet Through a Single Nozzle at Bottom Hole / H. Zhao, Z. Huang, H. Shi, Z. Chen, Z. Gu, F. Gao // Proceedings of the 48th National Conference on Fluid Mechanics and Fluid Power (FMFP). December 27-29, 2021, BITS Pilani, Pilani Campus, RJ, India. Easy Chair Preprint № 6570. 7 p. <https://easychair.org/publications/preprint/WP1Q>.
4. Meakhail T.A. A Study of the Effect of Nozzle Spacing and Driving Pressure on the Water Jet Pump Performance / T.A. Meakhail, I.R. Teaima // International Journal of Engineering Science and Innovative Technology (IJESIT). – 2013. – Volume 2. – Issue 5. – P. 373 – 382. <https://www.ijesit.com> > IJESIT201305_51.
5. Butenko A.G., Improving efficiency of the jet pump at low coefficients of ejection / A.G. Butenko, S.Yu. Smik // ENERGETIKA. Proceedings of CIS higher education institutions and power engineering associations. – 2015. – № 2. – P. 80-87. (In Russ.). <http://dspace.opu.ua/jspui/handle/123456789/8886>.
6. Nedelcuț F. ANSYS flowizard used to optimize an water ejector / F. Nedelcut, N. Iacob, C.Cuciuc // Journal of Industrial Design and Engineering Graphics. – 2012. – Volume 7. – Issue 2. – P. 19–22. <https://www.researchgate.net/publication/308349408>.
7. Urazakov K.R. Modeling the characteristics of jet pump / K.R. Urazakov, I.A. Muhin, R.I. Vahitova // Electrical and data processing facilities and systems. – 2015. – № 4. – V. 11. – P. 41–50. <https://cyberleninka.ru>.
8. Chaburko P.S. Numerical Simulation of Fluid Flow in the Jet Pump / P.S.Chaburko, V.O. Lomakin // Russian Internet Journal of Industrial Engineering. – 2014. – Vol. 2. – no. 3. – P. 55–58. <http://www.indust-engineering.ru>.
9. Song X.-G. Performance comparison and erosion prediction of jet pumps by using a numerical method / X.-G. S. Song, J.-H. Park, S.-G. Kim, Y.-C. Park // Mathematical and Computer Modelling. – 2013. – № 57. – P. 245 – 253. <http://dx.doi.org/10.1016/j.mcm.2011.06.040>.