

МОДЕЛЮВАННЯ СИЛОВОЇ СЕКЦІЇ ГВИНТОВИХ ВИБІЙНИХ ДВИГУНІВ

В. Білецький^{1*}, С. Ландар², Ю. Міщук³

¹Кафедра видобування нафти, газу та конденсату, Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", Харків, Україна

²ТОВ "Укрнафтагазсервіс", Полтава, Україна

³Кафедра обладнання нафтових і газових промислів, Полтавський національний технічний університет ім. Ю. Кондратюка, Полтава, Україна

*Відповідальний автор: e-mail ukcdb@i.ua, тел. +380951245231

MODELING OF THE POWER SECTION OF DOWNHOLE SCREW MOTORS

V. Biletskyi^{1*}, S. Landar², Yu. Mishchuk³

¹Department of Oil, Gas and Condensate Extraction, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine

²LLC "Ukrnaftahasservis", Poltava, Ukraine

³Department of Equipment of Oil and Gas Fields, Poltava National Technical Yuri Kondratyuk University, Poltava, Ukraine

*Corresponding author: e-mail ukcdb@i.ua, tel. +380951245231

ABSTRACT

Purpose. Downhole screw motors (DSMs) are commonly used for drilling wells of various applications. The problem is to ensure reliable operation of DSM, particularly its power section "rotor – stator". To evaluate its functioning, it is necessary to study the work of the Wenzel Downhole Tools Company downhole screw motor of 171 mm diameter under the conditions of drilling rigs during the development of Gnidyntsiivsk oil field in order to select the rational design and operational parameters of DSMs, which ensure their reliable and efficient functioning.

Methods. The SolidWorks Software Flow Simulation module has been applied to simulate the flow of liquids and gases based on the use of their typical physical models.

Findings. The models of the fields of velocity, pressure and temperature of the drilling mud in the plane of the section of the working couple "rotor – stator", as well as the models of the fields of pressure and temperature on the rotor surface are obtained. Graphs of changes in the studied parameters are constructed. The analysis of the models and curves obtained as a result of the research is carried out.

Originality. The original solution of this problem by creating a mathematical model of the drilling mud movement in the power section of the downhole screw motor has been proposed, which involved obtaining parametric fields of velocity, pressure and temperature.

Practical implications. The models are recommended for hydraulic and thermodynamic calculations of downhole screw motor.

Keywords: downhole screw motor, power section "rotor – stator", drilling mud, simulation, parametric fields

1. ВСТУП

Для сучасного етапу освоєння родовищ вуглеводнів актуальним є буріння горизонтальних, похило-скерованих та вертикальних нафтових і газових свердловин, а також дегазаційних свердловин в комплексах видобутку метану вугільних родовищ, дорозвідці шахтних полів каустобіолітів. З цією метою використовуються гвинтові вибійні двигуни (ГВД), які вигідно відрізняють порівняно мала металоємність і простота конструкції. Ротор і прогумований статор (Рис. 1) є найбільш відповідальними вузлами ГВД, від якості їх виготовлення залежать працездатність і надійність машин. Ротор ГВД має спеціальний профіль і визначеним кроком гвинтової лінії. Статор –

корпус у вигляді металевої труби з привулканізованою до неї зсередини гумовою обкладкою з внутрішньою гвинтовою поверхнею. В процесі роботи обкладка статора (еластомір) сприймає циклічно змінні навантаження, реактивний момент і радіальні сили.

Експлуатаційні переваги цих двигунів наступні: оптимальні кінематичні характеристики, що забезпечують ефективне відпрацювання доліт; мінімальні осьові габарити, що дозволяють використовувати ГВД при бурінні похило-спрямованих і горизонтальних свердловин, бокових стволів; простота збірки і ремонту. Разом з тим, ГВД має істотний недолік – швидкий знос силової пари, що привертає увагу дослідників до цього об'єкту (Ismakov, Zakirov, Al'-Sukhili, & Toropov, 2015).

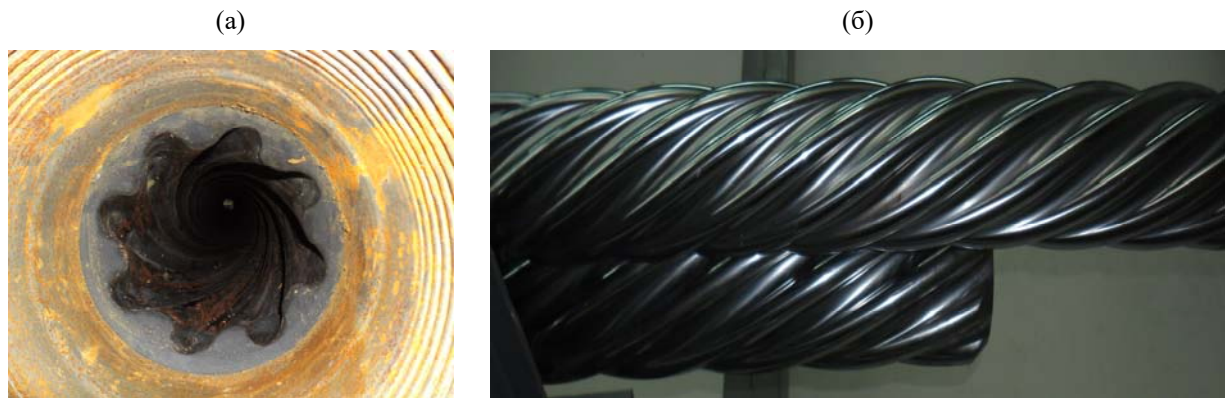


Рисунок 1. Загальний вид силової секції гвинтового вибійного двигуна: (а) статор; (б) ротор

При бурінні свердловини ГВД часто виникають проблеми, пов'язані з нестабільністю його роботи – чергуванням режимів від оптимального до гальмівного, а також зупинок двигуна, що обумовлено неоднорідністю гірських порід, зокрема, їх різною тривкістю. У екстремальному гальмівному режимі виникають додаткові гідравлічні втрати, які складаються з втрат в робочих органах гвинтової пари. Гідравлічні втрати призводять до зниження енергетичних характеристик героторної машини (Ovchinnikov, Dvoynikov, Bud'ko, & Prolyubshchikov, 2007).

У роботі (Ismakov, Zakirov, Al'-Sukhili, & Toropov, 2015) для оцінки напружено-деформованого стану статора в процесі експлуатації ГВД використано програмний комплекс ANSYS, який реалізує метод кінцевих елементів (SOLID92). Встановлено, що максимальний контактний тиск 0.78 МПа припадає на місце контакту западини статора з зубом ротора. Одним з актуальних напрямків вирішення завдання підвищення ефективності і технологічності гумометалевого статора названо підбір оптимальних бурових промивних рідин, мастильно-охолоджуючих рідин, мастильних добавок до останніх, що забезпечують збільшення ресурсу роботи статора.

Циклічне навантаження при обертанні ротора в гумовій обкладці статора обумовлює явище гістерезису, в результаті якого при кожному циклі відбувається виділення тепла і саморозігрів гумової обкладки (Andoskin, Vyguzov, Kuznetsov, Khayrullin, & Novikov, 2014). При цьому гума може втратити свої пружні властивості і перейти в крихкий стан, що призводить до швидкого розвитку тріщин і руйнування гумової обкладки. Наслідки такого руйнування показані в роботі (Andoskin, Vyguzov, Kuznetsov, Khayrullin, & Novikov, 2014). Компанією “Радіус-Сервіс” методом кінцевих елементів розраховано розігрів, напруження і деформацію гумової обкладки статора при обертанні (обкатці) ротора в типових умовах буріння. Зокрема, при витраті 35 л/с, динамічній температурі бурового розчину 60°C і диференціальному перепаді тиску на двигуні 4.4 МПа через 30 хв буріння максимальна температура гумової обкладки рухової секції ГВД ДРУ2-172РС досягає 123°C (Andoskin, Vyguzov, Kuznetsov, Khayrullin, & Novikov, 2014).

У роботі (Syzrantseva & Syzrantsev, 2016) розглядається метод комп'ютерного моделювання для розрахунку навантаження на контактну зону робочих

частин гвинтового насоса та гвинтових двигунів. Запропонований метод визначає максимальну допустиму діаметральну щільність зношених експлуатаційних частин, критичне значення, за яким герметичність робочих камер, що відображає працездатність насоса та двигуна, більше не гарантується.

Автори (Weng, Yue, Shi, & Huang, 2013) виконали експериментальний аналіз для визначення основних факторів, які спричинили несправності роторів ГВД спеціальним тестом. Встановлено, що цими факторами є знос поверхні ротора під дією абразивних частинок та хлорид-йонів, що містяться в мінералізованих соленасичених добавках до бурового розчину.

За даними бурових компаній ТОВ “Газпром буріння” і “КСА Deutag”, за рік відбувається від 5 до 12 аварій з ГВД, які призводять до тривалих відновлювальних робіт на свердловині, або повної її ліквідації. При цьому практика застосування ГВД показує, що близько 50% всіх відмов пов'язано зі зносом робочих органів, тобто пари тертя “гума – метал” (“сталевий ротор – гумометалевий статор”). Термін експлуатації ГВД, в залежності від типорозміру і умов експлуатації, становить 90 – 235 год. Підкреслюється актуальність розробки методів триботехнічних випробувань ГВД, отримання різноманітної інформації, яка дозволить оцінити вплив режимних факторів на нестабільність роботи ГВД, їх зупинки, термін служби робочих органів, а також аварії (Ismakov & Al'-Sukhili, 2015).

Таким чином, проблема забезпечення надійного функціонування ГВД багатofакторна і детермінується, в першу чергу, роботою пари “статор – ротор”, режимами течії робочої рідини. Для оцінки функціонування ГВД, виокремлення основних чинників впливу необхідно отримати і проаналізувати параметричні поля течії рідини в робочій парі “ротор – статор”, зокрема, поля швидкостей, тисків та температур бурового розчину.

2. ОСНОВНА ЧАСТИНА

За об'єкт досліджень взято вибійний гвинтовий двигун виробництва компанії Wenzel Downhole Tools діаметром 171 мм при бурінні Гнідинцівського нафтового родовища.

При дослідженні ГВД прийняті такі характеристики бурового розчину: густина – 1100 кг/м³; динамічна в'язкість – 0.02 Па·с; питома теплоємність –

4.2 Дж/(кг·К); теплопровідність суспензії – 0.6 Вт/(м·К). Режимні параметри роботи гвинтового двигуна: початкова температура бурового розчину – 30°C; тиск на вході у робочу пару ГВД – 24 МПа; об’ємна витрата бурового розчину – 27 л/с.

Для отримання моделей параметричних полів швидкостей робочої рідини, поля тисків, дотичних напружень і температури вздовж поверхні ротора ГВД використано модуль Flow Simulation програмного середовища SolidWorks (SolidWorks, 2017).

Поля швидкостей робочої рідини в силовій секції ГВД. На Рисунку 2а показано одержані моделі поля

швидкості в площині осьового перерізу робочої пари “ротор – статор”, на Рисунку 2б, в – в площинах, паралельних осьовому перерізу робочої пари, які проходять відповідно через характерні точки максимуму і мінімуму швидкості суспензії.

Розташування характерних точок мінімуму та максимуму швидкості руху бурового розчину та епюри швидкостей в площинах перпендикулярних осьовому перерізу робочої пари, які проходить відповідно через точки максимуму і мінімуму швидкості суспензії представлено на Рисунку 3.

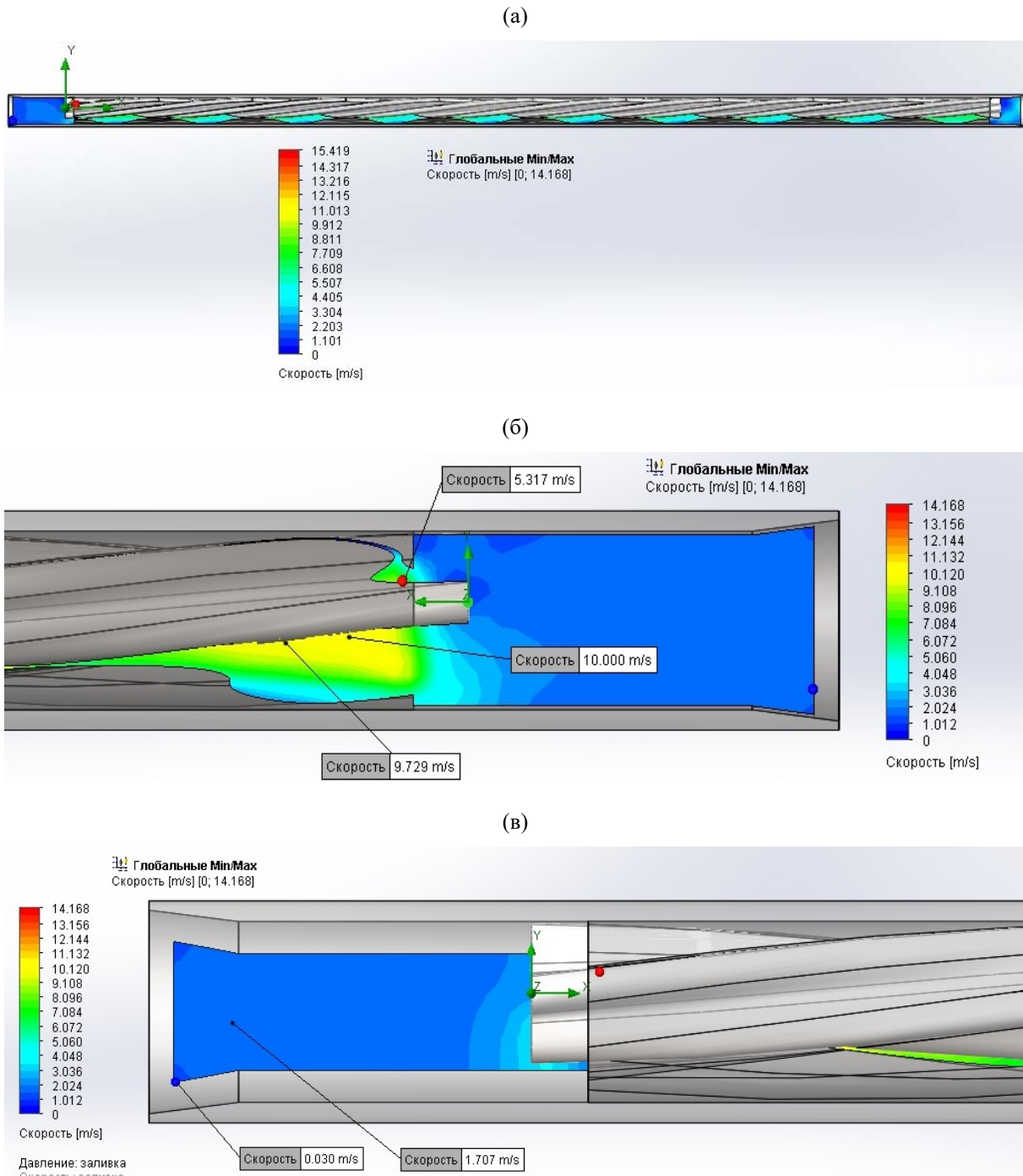


Рисунок 2. Модель поля швидкостей бурового розчину в площинах перерізу робочої пари “ротор – статор”: (а) переріз в осьовій площині ГВД; (б) і (в) перерізи в площинах, паралельних осьовому перерізу робочої пари, які проходять відповідно через характерні точки максимуму і мінімуму швидкості суспензії

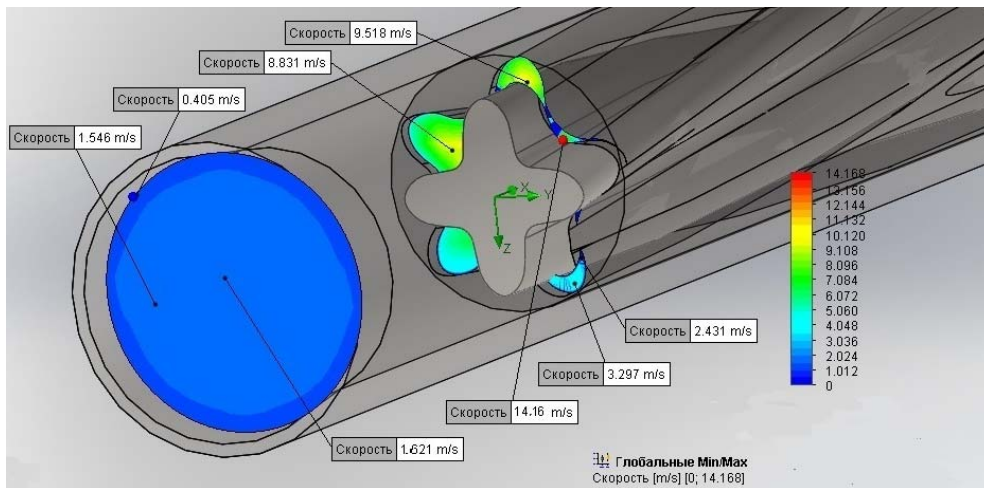


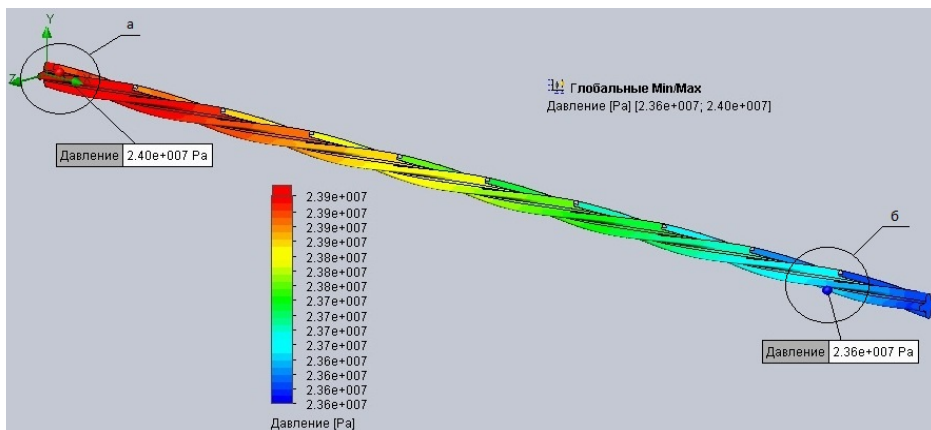
Рисунок 3. Модель поля швидкостей в поперечних площинах перерізу робочої пари “ротор – статор” в характерних точках максимуму та мінімуму швидкості

Під тиском промивної рідини ротор обкочується по внутрішній поверхні статора, здійснює планетарний рух, який через універсальні шарніри передається валу шпинделя, що обертає породоруйнуючий інструмент. При цьому, як видно з епюр Рисуноків 1 і 2, в порожнинах між ротором та статором спостерігається зміна швидкості робочої рідини від максимуму (14.16 м/с) до мінімуму (2.431 м/с). Найменша швидкість бурового розчину спостерігається в області входу в робочу секцію – по центру потоку 1.621 м/с, в пристінній зоні корпусу 0.405 м/с.

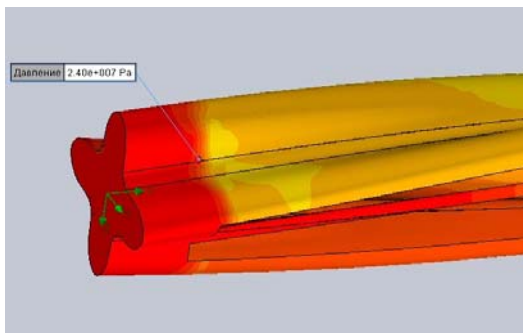
Найбільший знос робочих поверхонь статора і ротора ГВД від твердих частинок слід очікувати в зонах максимальної швидкості потоку, яка визначає кінетичну енергію твердих зерен.

Поля тисків робочої рідини в силевій секції ГВД. На Рисунок 4 показано одержані моделі поля тисків бурового розчину на поверхні ротора: по довжині силової секції ГВД, в зонах максимального (24 МПа) та мінімального тиску (23.6 МПа). Різниця обумовлена втратою напору робочої рідини по довжині силової секції.

(a)



(б)



(в)

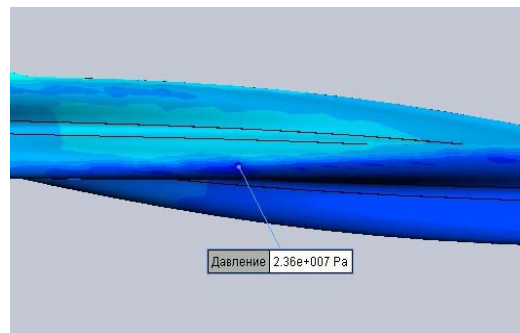


Рисунок 4. Модель поля тиску на поверхні ротора ГВД: (а) по довжині силової секції; (б) зона максимальних значень тиску; (в) зона мінімальних значень тиску

На Рисунку 5 подано одержані моделі поля тисків бурового розчину в поперечних площинах перерізу робочої пари “ротатор – статор”. Як і слід було очікувати, поля тисків корелюють з полями швидкостей (Рис. 3).

Чітко простежуються порожнини високого і низького тиску, які утворюються між зубцями ротора і статора. При цьому максимальний тиск (24 МПа) спостерігається в зоні протилежній напрямку обертання ротора. Тобто, за рахунок градієнту тиску на

тилову і фронтальну частину зуба ротора останній здійснює планетарний рух щодо осі статора, обкочуючись зубча гумової обкладки. Зафіксована різниця тисків створює на роторі і статорі моменти сили, рівні за величиною і протилежні за напрямом – активний і реактивний моменти. Активний момент використовується на обертання долота, реактивний момент сприймається колоною бурових труб і гаситься на стінках свердловин і в приводних механізмах, розміщених на поверхні.

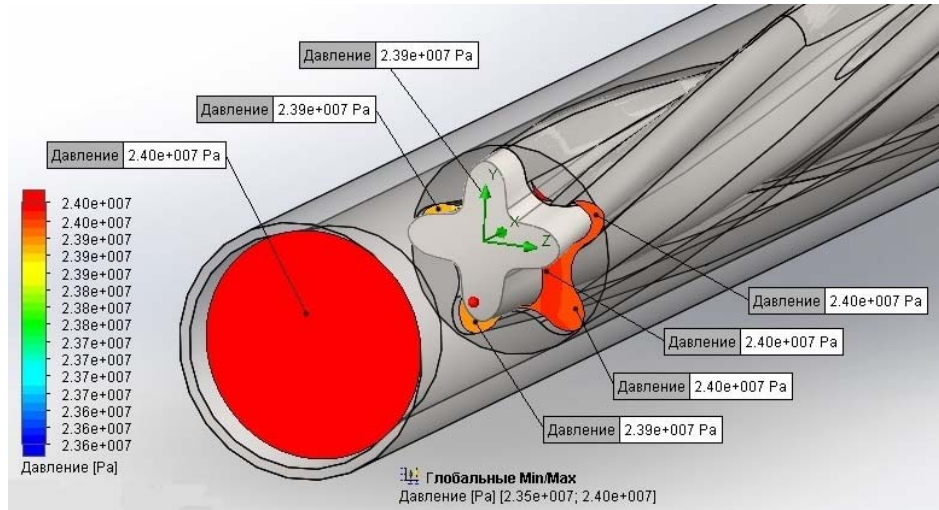


Рисунок 5. Моделі поля тисків бурового розчину в поперечних площинах перерізу робочої пари “ротатор – статор”

Поля температури бурового розчину в силевій секції ГВД. На Рисунку 6а показано одержані моделі поля температури бурового розчину на поверхні ротора ГВД. На Рисунках 6б, в – температури бурового розчину в площинах паралельних осьовому перерізу робочої пари, які проходять відповідно через характерні точки максимуму і мінімуму температури суспензії. Аналізуючи одержані дані слід відмітити, що діапазон температур бурового розчину в силевій секції ГВД досить великий – від 30°C до 144.58°C. Причини нагрівання бурового розчину потребують додаткового вивчення, але свою роль відіграє зафіксоване у дослідженнях (Andoskin, Vyuzov, Kuznetsov, Khayrullin, & Novikov, 2014) явище гістерезису, в результаті якого при кожному циклі відбувається виділення тепла і саморозігрів гумової обкладки, а також нагрівання бурового робочого елемента і, очевидно, перетворення частини тиску в тепло в парі “ротатор – статор”.

Максимальна температура нагрівання бурового розчину спостерігається на виході з силевої секції (Рис. 6б), мінімальна – на її вході (Рис. 6в).

На Рисунку 7 показано графік зміни температури бурового розчину вичислений на ребрі зуба ротора по довжині силевої секції. Дані Рисунка 7 надають уявлення про кількісну оцінку температури бурового розчину. Піки – “провали” співпадають з точками дотику ребра ротора до статора.

За результатами моделювання в Таблиці 1 наведено можливі максимальні та мінімальні значення розглянутих параметрів бурового розчину по довжині силевої секції ГВД, а саме швидкості, тиску та температури.

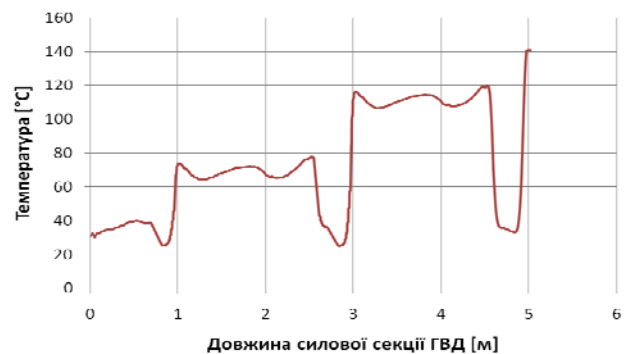


Рисунок 7. Графік зміни температури бурового розчину вичислений на ребрі зуба ротора по довжині силевої секції

Одержаний матеріал моделей ГВД може бути використаний при гідравлічних і термодинамічних розрахунках вибірного гвинтового двигуна, вибору раціонального режиму його експлуатації.

У подальших дослідженнях доцільно виконати моделювання ГВД з отриманням поля завихреності, поля інтенсивності турбулентності, поля масштабу турбулентностей, турбулентного масштабу часу, поля дотичних напружень для статора і ротора.

Таблиця 1. Максимальні та мінімальні значення параметрів бурового розчину

Параметр	Максимальне значення (max)	Мінімальне значення (min)
Швидкість, м/с	14.168	0.000
Тиск, МПа	24.000	23.500
Температура, °C	144.580	13.350

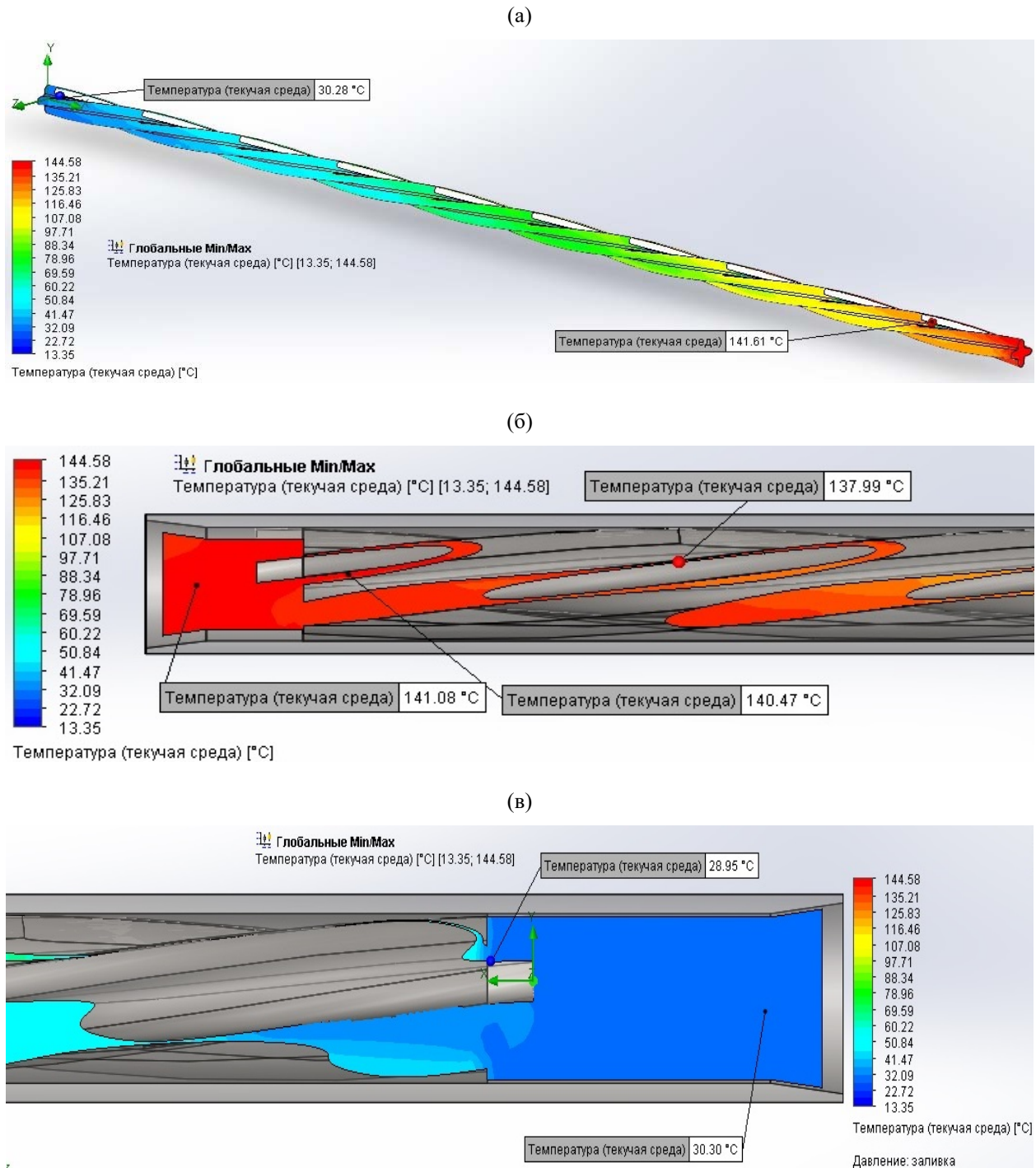


Рисунок 6. Модель поля температуры бурового розчину в силовій секції ГВД: (а) на поверхні ротора; (б) і (в) в площинах паралельних осьовому перерізу робочої пари, які проходять відповідно через характерні точки максимуму і мінімуму температури суспензії

3. ВИСНОВКИ

Для буріння горизонтальних, похило-скерованих і вертикальних нафтових і газових свердловин, а також дегазаційних свердловин в комплексах видобутку метану вугільних родовищ, дорозвідці шахтних полів каустобіолітів сьогодні активно використовуються гвинтові вибійні двигуни (ГВД). Актуальною задачею є вибір раціональної конструкції та режимних параметрів ГВД, які забезпечують надійне і ефективне їх функціонування.

Із застосуванням модуля Flow Simulation програмного середовища SolidWorks досліджено роботу вибійного гвинтового двигуна компанії Wenzel Downhole Tools діаметром 171 мм при бурінні Гнідницького нафтового родовища. Отримано параметричні поля течії рідини в гвинтовому двигуні, а саме в робочій парі “ротор – статор”.

Одержані моделі ГВД рекомендуються для використання при гідралічних і термодинамічних розрахунках вибійного гвинтового двигуна.

ВДЯЧНІСТЬ

Автори висловлюють подяку українським компаніям НТП “Бурова техніка” та “Укрнафгазсервіс” за надану інформацію стосовно вихідних параметрів ГВД, досвіду їх експлуатації, зокрема можливість ознайомлення з практикою роботи ГВД на Гнідинцівському родовищі (Україна).

REFERENCES

- Andoskin, V.N., Vyguzov, A.M., Kuznetsov, A.V., Khayrullin, D.N., & Novikov, R.S. (2014). Vintovye zaboynye dvigateli firmy “Radius – Servis”. *Burenie i Neft'*, (11), 50-53.
- Grosser, D. (2011). *The Future of SolidWorks Has 'Always' Been in YOUR Hands*. Retrieved from <http://blog.dasisolutions.com/2011/09/27/the-future-of-solidworks-has-always-been-in-your-hands/>
- Ismakov, R.A., & Al'-Sukhili. (2015). Issledovanie vliyaniy razlichnykh reagentov na rabotu silovoy seksii vintovykh zaboynykh dvigateley. *Neftegazovoe Delo*, (1), 64-78.

- Ismakov, R.A., Zakirov, N.N., Al'-Sukhili, M.Kh., Toropov, E.S. (2015). Issledovanie raboty pary “elastomer – metall” silovoy seksii vintovogo zaboynogo dvigatelya. *Sovremennye Problemy Nauki i Obrazovaniya*, (2-3), 1-8
- Ovchinnikov, V.P., Dvoynikov, M.V., Bud'ko, A.V., & Prolubshchikov, S.V. (2007). K voprosu prodleniya sroka sluzhby vintovykh zaboynykh dvigateley. *Burenie i Neft'*, (10), 24-26.
- SolidWorks. (2017). *SolidWorks Flow Simulation*. [online] Available at: <http://www.solidworks.com/sw/products/simulation/flow-simulation.htm>
- Syzrantseva, K., & Syzrantsev, V. (2016). Load on Multipair Contact Zones of Operating Parts of Screw Pumps and Motors: A Computer Analysis. *Procedia Engineering*, (2016), 768-774. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.07.104>
- Weng, W., Yue, W., Shi, X., & Huang, Y. (2013). Failure Analysis of the Rotor of Downhole Drilling Motors. In *International Conference on Pipelines and Trenchless Technology*. Xi'an: <https://doi.org/10.1061/9780784413142.089>

ABSTRACT (IN UKRAINIAN)

Мета. У практиці буріння свердловин різного призначення все частіше застосовуються гвинтові вибійні двигуни. Постає проблема забезпечення надійного функціонування ГВД, зокрема, робочої пари “ротор – статор”. Для оцінки його функціонування необхідно дослідити роботу гвинтового вибійного двигуна виробництва компанії Wenzel Downhole Tools діаметром 171 мм при бурінні Гнідинцівського нафтового родовища для вибору раціональної конструкції та режимних параметрів ГВД, які забезпечують надійне і ефективне їх функціонування.

Методика. Застосовано модуль Flow Simulation програмного середовища SolidWorks для моделювання течії рідин і газів на основі використання їх типових фізичних моделей.

Результати. Отримано моделі поля швидкостей, тисків та температури бурового розчину в площинах перерізу робочої пари “ротор – статор”, а також моделі поля тисків та температури на поверхні ротора. Побудовано графіки зміни досліджуваних параметрів. Виконано аналіз моделей та кривих, які отримано в результаті досліджень.

Наукова новизна. Розв’язання даної задачі шляхом побудови математичної моделі руху бурового розчину в силевій секції гвинтового вибійного двигуна, одержання параметричних полів швидкостей, тисків та температури.

Практична значимість. Одержані моделі рекомендуються для використання при гідравлічних і термодинамічних розрахунках вибійного гвинтового двигуна.

Ключові слова: гвинтовий вибійний двигун, пара “ротор – статор”, буровий розчин, моделювання, параметричні поля

ABSTRACT (IN RUSSIAN)

Цель. В практике бурения скважин разного назначения все чаще применяются винтовые забойные двигатели. Возникает проблема обеспечения надежного функционирования ВЗД, в частности, рабочей пары “ротор – статор”. Для оценки его функционирования необходимо исследовать работу винтового забойного двигателя производства компании Wenzel Downhole Tools диаметром 171 мм при бурении Гнидинцевского нефтяного месторождения для выбора рациональной конструкции и режимных параметров ВЗД, которые обеспечивают надежное и эффективное их функционирования.

Методика. Применен модуль Flow Simulation программной среды SolidWorks для моделирования течения жидкостей и газов на основе использования типических физических моделей.

Результаты. Получены модели поля скоростей, давлений и температуры бурового раствора в плоскостях разреза рабочей пары “ротор – статор”, а также модели поля давлений и температуры на поверхности ротора. Построены графики изменения исследуемых параметров. Выполнен анализ моделей и кривых, полученных в результате исследований.

Научная новизна. Решение данной задачи путем построения математической модели движения бурового раствора в силовой секции винтового забойного двигателя, получения параметрических полей скоростей, давлений и температуры.

Практическая значимость. Полученные модели рекомендуются для использования при гидравлических и термодинамических расчетах забойного винтового двигателя.

Ключевые слова: винтовой забойный двигатель, пара “ротор – статор”, буровой раствор, моделирование, параметрические поля

ARTICLE INFO

Received: 10 July 2017

Accepted: 5 September 2017

Available online: 30 September 2017

ABOUT AUTHORS

Volodymyr Biletskyi, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Oil, Gas and Condensate Extraction, National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”, 85 Pushkinska St, 61023, Kharkiv, Ukraine. E-mail: ukcdb@i.ua

Serhii Landar, Head of the Service Management, LLC “Ukrnaftahasservis”, 3 Shevchenka St, 36000, Poltava, Ukraine. E-mail: sergiy.landar@ungs-drilling.com.ua

Yuliia Mishchuk, Assistant Professor of the Department of Equipment of Oil and Gas Fields, Poltava National Technical Yuri Kondratyuk University, 24 Pershotravnevyi Ave., 020/1-A, 36011, Poltava, Ukraine. E-mail: kiri4okjulia@ukr.net