

---

# **Матеріали, конструкції та обладнання об'єктів нафтогазового комплексу**

---

УДК 622.244.441

DOI: 10.31471/1993-9868-2020-2(34)-46-55

## **ДОСЛІДЖЕННЯ ГІДРОДИНАМІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ТА МОДЕРНІЗАЦІЯ ЕЛЕМЕНТІВ БУРОВОГО ДОЛОТА PDC**

**Я. С. Білецький, Т. Я. Шимко, І. Я. Білецька, М. В. Сенюшкович,  
В. В. Михайлюк, Р. О. Дейнега**

*ІФНТУНГ; 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. 0503730735,  
e-mail: drill@nuing.edu.ua*

*Стрімкий розвиток технологій спорудження свердловин невід'ємно пов'язаний із вдосконаленням техніки, що при цьому застосовується. Широкого використання набули інструменти нового покоління – долота із алмазними різцями (PDC), які мають значно кращі техніко-економічні показники порівняно із шарошковими. Хоча їх конструкція є доволі відпрацьована, актуальним залишається питання оптимізації параметрів роботи гідромоніторних насадок, від конструктивних особливостей яких залежить ефективність спорудження свердловин. Не зважаючи на ефективність існуючої конструкції доліт PDC, проведено дослідження гідродинамічних параметрів за допомогою імітаційного моделювання. Таке дослідження дає змогу оцінити гідродинамічні параметри роботи долота, розробити рекомендації щодо їх покращення, що, в свою чергу, дозволить підвищити ефективність спорудження свердловин у цілому. Комп'ютерні програми, що призначені для імітаційного моделювання гідродинамічних процесів, дають змогу з великою достовірністю визначити необхідні параметри. Проте, точність отриманого результату буде залежати не тільки від налаштувань сітки кінцевих об'ємів, кількості ітерацій, а і від вхідних даних. Тому у розрахунковій моделі, окрім основних параметрів, таких як витрата бурового розчину і тиск на вибої свердловини, враховано частоту обертання долота, густину, температуру та модель в'язкості бурового розчину, шорсткість поверхні долота, стінок та вибою свердловини. В результаті імітаційного моделювання було виявлені окремі недоліки існуючих конструкцій доліт PDC, які можливо усунути за допомогою запропонованої конструкції гідромоніторної насадки, яка: створює більшу завихреність потоку рідини, що позитивно впливає на захоплення та винесення шламу; дає можливість регулювати напрям руху рідини (особливо важливо для насадок, які розміщені подалі від осі долота), що покращить винесення шламу і, відповідно, запобігатиме повторному потраплянню його на вибій.*

**Ключові слова:** свердловина, долото, вибій, гідродинамічний параметр, імітаційне моделювання, тиск, швидкість, завихреність, буровий розчин.

*Стремительное развитие технологий сооружения скважин тесно связано с совершенствованием техники, которая при этом используется. Широкое применение имеют инструменты нового поколения – долота с алмазными резцами (PDC), имеющие значительно лучшие технико-экономические показатели по сравнению с шарошечным долотом. Хотя их конструкция хорошо проработана, все же актуальным остается вопрос оптимизации параметров работы гидромониторных насадок, от конструктивных особенностей которых зависит эффективность сооружения скважин. Несмотря на эффективность существующей конструкции долот PDC, проведено исследование их гидродинамических параметров с помощью имитационного моделирования. Такое исследование позволяет оценить гидродинамические параметры работы*

долота, розробити рекомендації по їх удосконаленню, що, в свою чергу, дозволить підвищити ефективність спорудження скважин в цілому. Комп'ютерні програми, призначені для імітаційного моделювання гідродинамічних процесів, дозволяють з великою достовірністю визначити необхідні параметри. Однак, точність отриманого результату буде залежати не тільки від налаштувань сітки кінцевих об'ємів, кількості ітерацій, але й від вихідних даних. Тому в розрахунковій моделі крім основних параметрів, таких як витрата бурового розчину і тиск на забій скважини, враховані частота обертання долота, густина, температура і модель в'язкості бурового розчину, шорсткавість поверхонь долота, стінок і забоя скважини. В результаті імітаційного моделювання були виявлені недоліки існуючих конструкцій долот PDC, які можна усунути з допомогою запропонованої конструкції гідромоніторної насадки, яка: створює велику завихреність потоку рідини, що позитивно впливає на захоп і видалення шламів; дозволяє регулювати напрям руху рідини (особливо важливо для насадок, які розміщені далі від осі долота), що покращить видалення шламів і, відповідно, запобіжить повторне потрапляння його на забій.

Ключові слова: скважина, долото, забій, гідродинамічний параметр, імітаційне моделювання, тиск, швидкість, завихреність, буровий розчин.

*The rapid development of well construction technologies is inherently associated with the improvement of the technology that is used in this case. Tools of a new generation - bits with diamond cutters (PDC) - are widely used, in which technical and economic indicators are significantly better than roller cone bits. Although their design is well developed, the issue of optimizing the operation parameters of jetting nozzles, the design features of which determines the efficiency of well construction, remains relevant. Despite the effectiveness of the existing design of PDC bits, the study of hydrodynamic parameters was carried out using simulation modeling. Such a study makes it possible to assess the hydrodynamic parameters of the bit, develop recommendations for their improvement, which in turn will improve the efficiency of well construction in general. Computer programs designed for simulation of hydrodynamic processes make it possible to determine the necessary parameters with great reliability. However, the accuracy of the obtained result will depend not only on the settings of the grid of finite volumes, the number of iterations, but also on the initial data. Therefore, in the calculation model, in addition to the main parameters, such as the flow rate of the drilling fluid, the pressure at the bottom of the well, the bit rotation frequency, density, temperature and model of the drilling fluid viscosity, the roughness of the surfaces of both the bit and the walls, and the bottom of the well are taken into account. As a result of simulation, the drawbacks of the existing designs of PDC bits were identified, which can be eliminated using the proposed design of the jet nozzle, which: creates a large vorticity of the fluid flow, which positively affects the capture and removal of cuttings; makes it possible to regulate the direction of fluid movement (especially important for nozzles that are located farther from the bit axis), which will improve the removal of cuttings and, accordingly, will prevent it from re-entering the bottom.*

Key words: well, bit, bottom hole, hydrodynamic parameter, simulation, pressure, velocity, vorticity, drilling mud.

## **Вступ**

Техніка та технологія спорудження свердловин сьогодні стрімко розвивається. За останні десятиліття в Україні та закордоном введено у буріння інструменти нового покоління, у тому числі і долота. Вони дозволяють у понад десять разів підвищити середню проходку порівняно із кращими серійними шарошковими долотами.

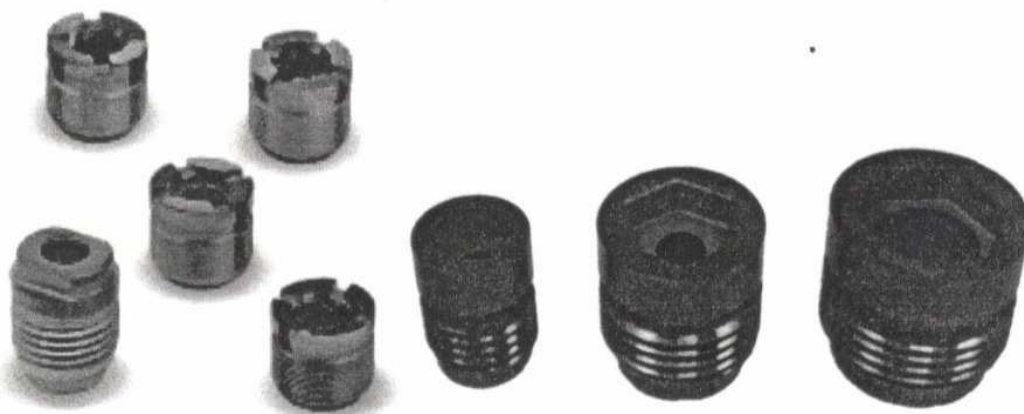
Зазвичай долота PDC оснащені гідромоніторними насадками, що спрямовують струмені промивальної рідини на вибій свердловини. Хоча сьогодні конструкції гідромоніторних насадок добре вивчені, актуальним залишається питання оптимізації параметрів їх роботи, оскільки з практики буріння нафтових і газових свердловин випливає, що витрати на процес промивання складають близько 10-30% від загальної вартості їх спорудження. При цьому задіяна майже половина потужності приводу бурових установок. У зв'язку з цим одним із

актуальних завдань технології буріння свердловин є підвищення ефективності роботи промивальних систем бурового інструменту.

## **Аналіз сучасних вітчизняних та закордонних досліджень і публікацій**

Основними вимогами для забезпечення якісної роботи системи промивання свердловини є:

- забезпечення промивальною рідиною умов для ефективного механічного руйнування породи незалежно від величини тиску на ділянці вибою, що руйнується, який може бути меншим за пластовий, більший пластового чи рівний йому;
- потік промивальної рідини має за найменшої витрати забезпечувати відокремлення частинок вибуреної породи від вибою, їх захоплення і видалення таким чином, щоб виключити повторне подрібнення озброєнням долота;



**Рисунок 1 – Конструкції гідромоніторних насадок доліт**

• при бурінні гідромоніторними долотами промивальна рідина повинна ефективно руйнувати породу, особливо в зоні, що передує руйнуванню, оскільки спільна дія зубків долота з гідродинамічною дією потоку сприяє успішному відриву частинок породи різної величини.

Високошвидкісний струмінь, що витікає із насадки, має рівномірне поле швидкостей і відносно низький п'єзометричний напір. У міру віддалення від вихідних кромок насадки струмінь розширюється, захоплює рідину з прилеглих до неї областей і набуває конічної форми. На периферії конуса в області захоплення рідини з сусідніх областей швидкості низькі, в центрі конуса швидкості залишаються високими на відстані, рівній декільком діаметрам насадки. На відстані від насадки більше десяти діаметрів швидкість струменя мала, частково відновлюється п'єзометричний напір. Чим далі насадка, тим більший перетин струменя, менша швидкість і вищий гідростатичний напір. Отже, з віддаленням насадок від вибою зростає площа впливу струменя і диференціальний тиск, у результаті чого погіршується відрив частинок породи від вибою [1]. При великих діаметрах промивних отворів і великій відстані до вибою струмінь не досягає його, проте створює надлишковий тиск вибій, внаслідок чого погіршується не тільки відрив частинок породи, але і ускладнюється винесення шламу з вибою.

Спроба вдосконалити процес очищення вибою тільки шляхом збільшення витрати рідини без вдосконалення геометричних параметрів промивних вузлів (без оптимізації їх розміру, форми і місця розташування) може лише погіршити якість промивання, оскільки призводить до зростання диференційного тиску на вибій внаслідок збільшення втрат напору в кільцевому просторі і долоті через великі площі, що піддаються впливу надлишкового тиску, і великої ерозійної дії промивальної рідини, яка

містить абразивні частинки і має великі швидкості у всьому об'ємі роботи долота. Більш перспективним напрямком, вочевидь, слід визнати підведення до насадки лише необхідної витрати, а раціональний перепад тиску в насадках має визначатися швидкістю витікання, обраною з умови ефективного очищення, яка сприяє інтенсивному механічному руйнуванню породи струменями на вибої (у гідромоніторних долотах).

Крім того, необхідно враховувати, що при спрямуванні струменя під кутом до вибою можливе:

- додаткове зниження тиску на окремих ділянках вибою;
- збільшення гідродинамічного тиску струменя на нерівності вибою;
- зростання напружень розтягу і деформацій зсуву.

З останнього випливає можливість корисного використання гідродинамічного тиску для руйнування порід [2].

Одним з важливих завдань при розробленні гідромоніторних доліт є правильний вибір відстані насадок відносно вибою, їх геометричних параметрів та напрямків поширення струменя. При цьому основною проблемою є конструктивне розміщення насадок в долоті.

Як правило, на долото встановлюють гідромоніторні насадки одного типорозміру (рис. 1). Якщо це неможливо, використовують насадки з мінімальною різницею за внутрішнім діаметром.

Гідромоніторні насадки встановлюють так, щоб в областях, обмежених великими лопатями, комбінація гідромоніторних насадок була симетрична по внутрішньому діаметру (рис. 2). На долотах, у яких біля великих лопатей встановлено по дві гідромоніторні насадки, меншу за діаметром насадку встановлюють ближче до центру, а більшу – далі від нього.

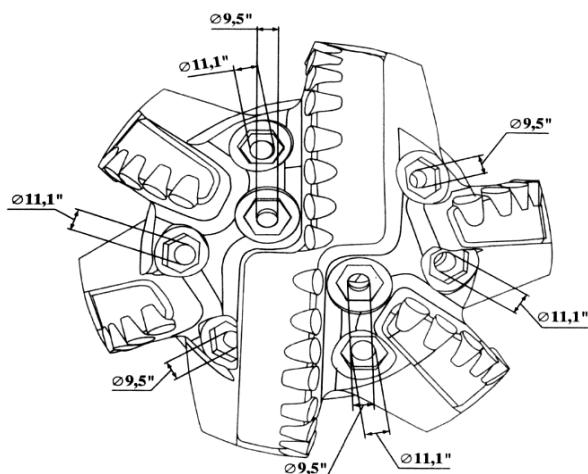


Рисунок 2 – Схема розміщення гідромоніторних насадок

Проте і досі проводиться багато досліджень, що стосуються роботи гідромоніторних насадок. Вони опираються на розв'язання рівняння тиску, напруження та інших величин, отриманих шляхом аналітичного інтегрування вихідних рівнянь руху в спрощеній постановці. Ці рівняння є основою для співвідношень, що дають змогу оцінити ефективність винесення шламу буровим розчином, величини швидкостей потоку в зоні вибою, втрат тиску на долоті тощо. Так, наприклад, у роботах [Бабаян, 2009; Есьман, Гарбузов, 1991; Козодой, Зубарев, Федоров, 1963; Куликов, 2008, Рябченко, 1977] для оцінки ефективності винесення шламу на поверхню під час промивання використовуються формула Рітгінгера, за якою визначають необхідні параметри промивальної рідини, проте питання про характер її руху у зоні вибою та факторах, що впливають на очищення долота від вибуреної породи, авторами зазначених робіт не розглядалися. У роботах [Варламов, 2008; Ledgerwood, Wells, Wiesner, Harris, 2000] проведено експериментальні дослідження потоку промивальної рідини у зоні вибою. На основі аналізу отриманих результатів було виявлено ряд чинників, які найбільше впливають на процес очищення зони вибою та елементів озброєння долота від шламу. Зазначається, що на процес очищення долота першочергово впливають параметри струменя, що визначаються ступенем гідродинамічної досконалості насадки, хвилею динамічного тиску струменя, що виникає під час удару в нерухому стінку, та поперечні потоки рідини у зоні вибою.

Оптимальний вибір профілю насадок, кількості та орієнтації гідромоніторних отворів, вочевидь, не може опиратися тільки на інженерні підходи. Для прийняття конструктивних рішень, що забезпечують ефективне очищення

долота та винесення шламу на поверхню, необхідно проаналізувати картину потоку бурового розчину у зоні вибою та кільцевому каналі свердловини. Проведення експериментальних досліджень потоку рідини у зоні вибою під час буріння викликає значні труднощі та потребує відносно великих матеріальних та часових витрат. Альтернативою натурних випробовувань є проведення віртуальних експериментів, у яких необхідні фізико-технічні умови буріння моделюються за допомогою спеціалізованих комп'ютерних програм. Зазначений спосіб є менш затратним, проте для отримання адекватних результатів моделювання необхідно забезпечити відповідність всіх моделей реальним об'єктам та умовам. Це можливо тільки за умови верифікації результатів з експериментальними даними.

Незважаючи на велику кількість досліджень, присвячених проблемам витікання промивальної рідини із гідромоніторних отворів доліт, питання сумісного впливу декількох струмин та схеми розміщення гідромоніторних отворів на характер очищення зони вибою від вибуреної породи залишаються не вивченими. Якість очищення вибою також залежить від ступеня турбулізації рідини у привибійній зоні: чим вона є вищою, тим краще та швидше очищається вибій свердловини від вибуреної породи. Крім того, для PDC доліт відома проблема розмивання внутрішньої порожнини основного гідромоніторного каналу біля місць розділення потоку та виходу у роздавальні канали долота.

#### Мета роботи та обґрунтування необхідності її виконання

Метою роботи є встановлення гідродинамічних параметрів долота PDC за допомогою імітаційного моделювання із врахуванням наближених до реальних умов його роботи,

Проведення таких досліджень дасть змогу оцінити гідродинамічні параметри роботи долота, розробити рекомендації щодо їх покращення, що, в свою чергу, дозволить підвищити ефективність спорудження свердловин загалом.

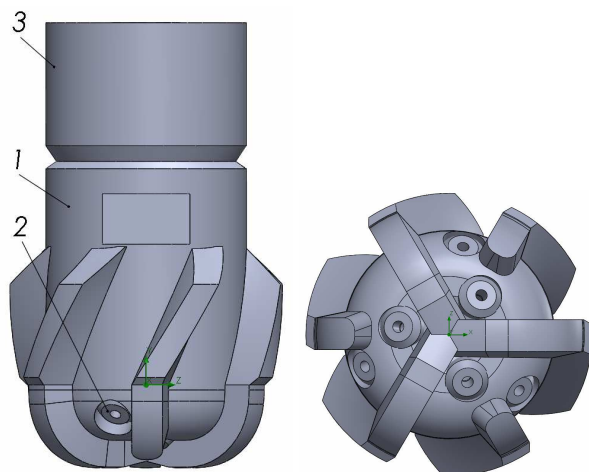
#### Викладення основного матеріалу

Для розв'язання задач гідродинаміки існують різноманітні комп'ютерні програми, серед яких SolidWorks Flow Simulation, Ansys CFD, ANSYS Fluent, Autodesk CFD, Компас тощо.

Досить зручною є програма SolidWorks Flow Simulation, оскільки вона найбільш CAD-вбудована CFD-програма у цьому класі. Для запуску моделювання гідрогазодинаміки в інтерфейсі SolidWorks присутні спеціальні пун-

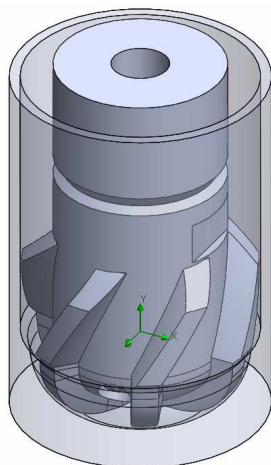
кти меню, а значить, немає необхідності запускати для цього окремий додаток. Об'єми геометрії, використані для CFD-аналізу, і граничні умови безпосередньо пов'язані з тривимірними поверхнями геометрії SolidWorks, що виключає необхідність у перевизначенні налаштувань моделі для експериментів з простими змінами геометрії.

Для імітаційного моделювання роботи долота PDC побудовано його тримірну модель (рис. 3), яку розміщено у моделі свердловини (рис. 4).



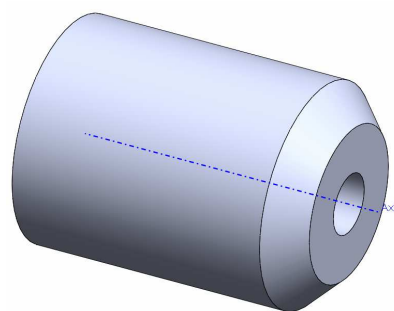
1 – корпус; 2 – гідромоніторна насадка;  
3 – бурильна труба

**Рисунок 3 – Тримірна модель бурового долота**

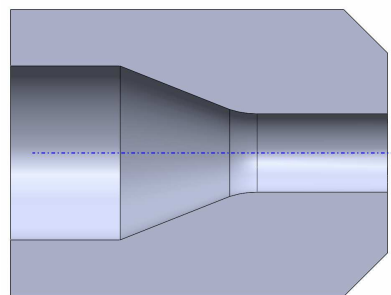


**Рисунок 4 – Розміщення моделі долота у свердловині**

Гідромоніторні насадки (рис. 5) у досліджуваній моделі долота мають однаковий діаметр внутрішнього отвору, який на виході рівний 9 мм.



а)



б)

а – загальний вигляд; б – поперечний переріз

**Рисунок 5 – Модель гідромоніторної насадки**

Вхідними параметри для моделювання прийнято:

- витрата бурового розчину -  $0,03 \text{ м}^3/\text{с}$ ;
- тиск на вибої свердловини - 11 МПа;
- частота обертання долота - 15 рад/с;
- густина розчину -  $1110 \text{ кг}/\text{м}^3$ ;
- температура розчину -  $100 \text{ }^\circ\text{C}$ ;
- модель в'язкості розчину – Гершеля-Балклі [3].

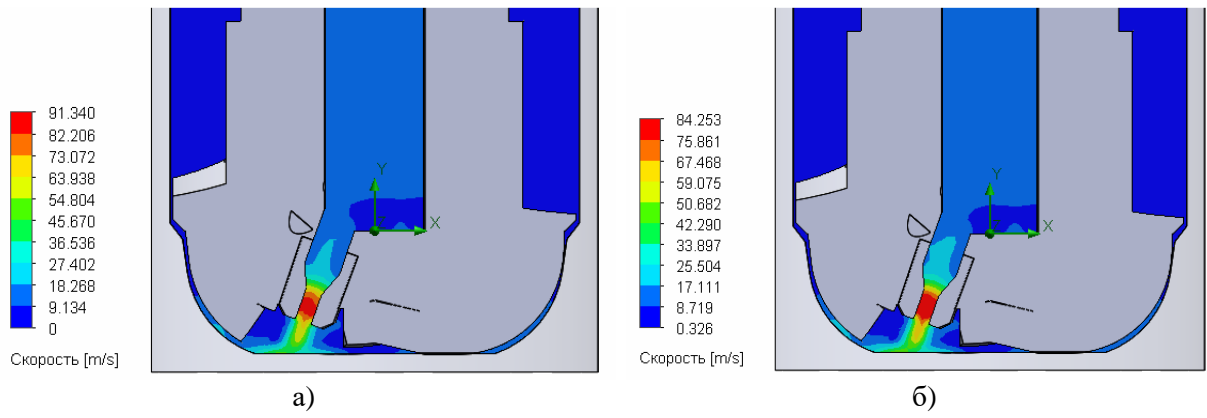
Слід зауважити, що з метою спрощення розрахунку для ПК задано обертання не бурового долота, а стінки свердловини. Також при моделюванні враховано шорсткість поверхонь стінки свердловини, яка рівна 650 мкм.

Результати імітаційного моделювання можуть виводитися у двох варіантах: глобальними максимумами та локальними мінімумами. Глобальні значення результатів стосуються всієї досліджуваної моделі, а локальні показують граничні значення параметрів тільки по виділеному перерізі (або області).

Параметрами, які досліджуються при імітаційному моделюванні долота, є розподіли тиску та завихреності на вибої та стінці свердловини, швидкість бурового розчину на виході із гідромоніторної насадки та у просторі між долотом і стінкою свердловини.

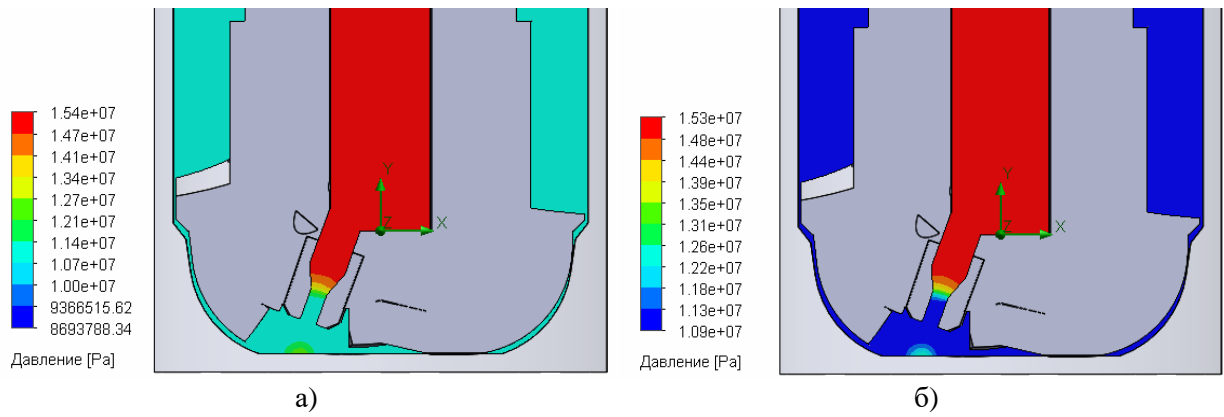
Цікавою є картина розподілу швидкості у інших гідромоніторних насадках (рис. 11).





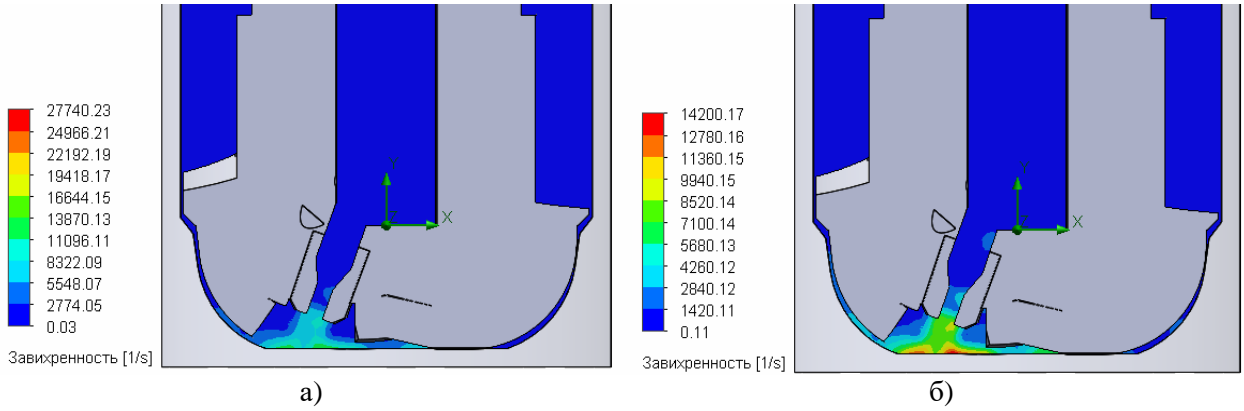
а – глобальний максимум; б – локальний мінімум

Рисунок 6 – Розподіл швидкості в поперечному перерізі моделі



а – глобальний максимум; б – локальний мінімум

Рисунок 7 – Розподіл тиску в поперечному перерізі моделі



а – глобальний максимум; б – локальний мінімум

Рисунок 8 – Розподіл завихреності в поперечному перерізі моделі

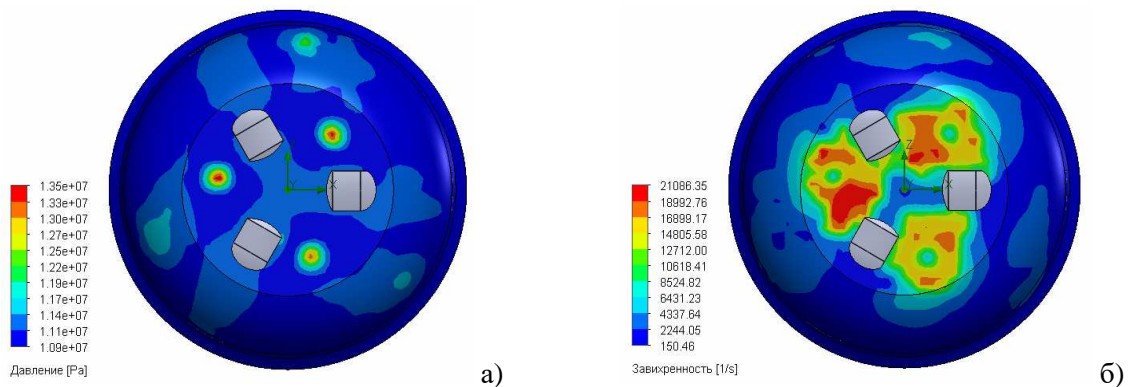


Рисунок 9 – Розподіл тиску (а) та завихреності (б) на вибої моделі свердловини

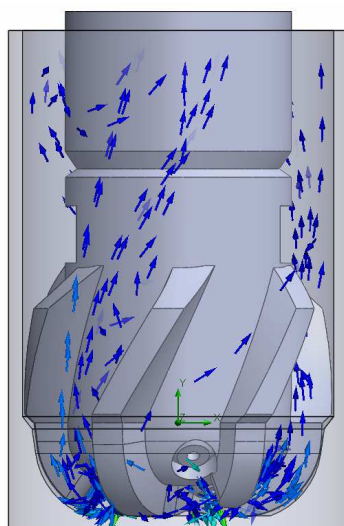


Рисунок 10 – Траєкторії руху потоку бурового розчину

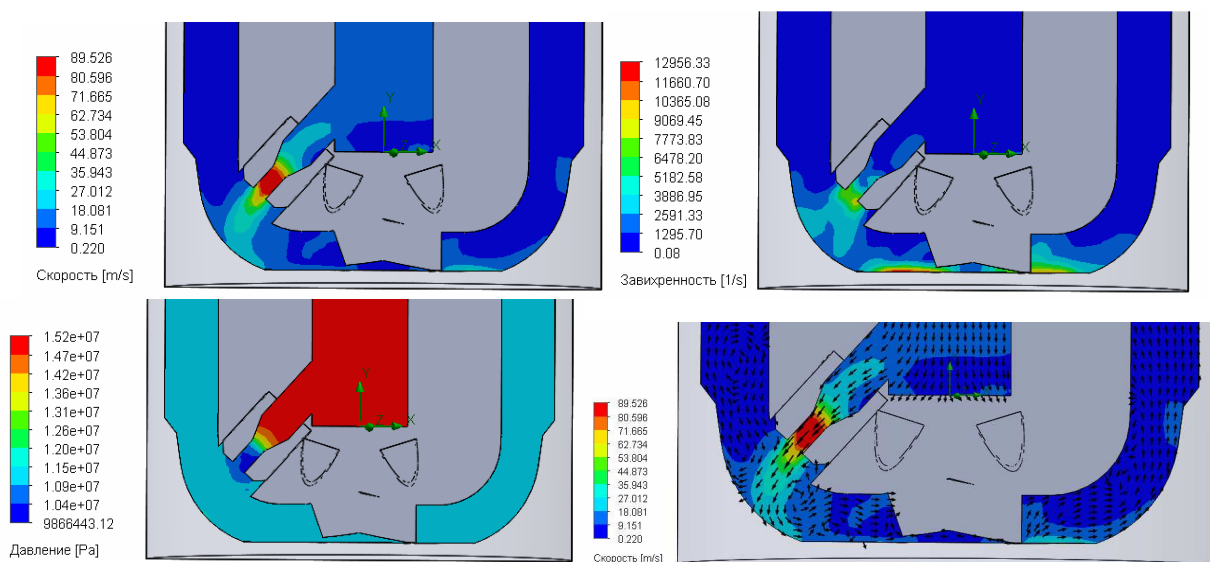


Рисунок 11 – Розподіл швидкості у гідромоніторних насадках

Отже, як видно із рисунків, потік рідини із бокової насадки розділяється. Частина його рухається вгору, виносячи шлам, а інша – вниз, захоплюючи при цьому частину шламу, який буде повторно потрапляти на вибій, а отже, на озброєння долота.

Для усунення цього недоліку пропонується змінити конструкцію насадки [4], а саме виконати промивний канал по траєкторії, зображеної на рис. 12.

Результати імітаційного моделювання роботи долота із зміненою конструкцією насадки подано на рисунках 13-18.

Нерівномірність розподілу тиску та завихреності на вибій свердловини пояснюється тим, що у досліджуваній моделі гідромоніторні насадки встановлені під різними кутами (рис. 19).

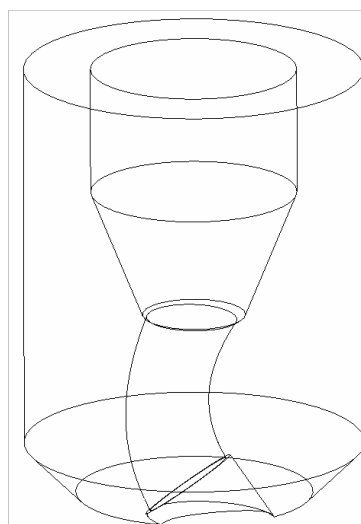


Рисунок 12 – Схема конструкції насадки (відображення каркасне із тонкими невидимими лініями)

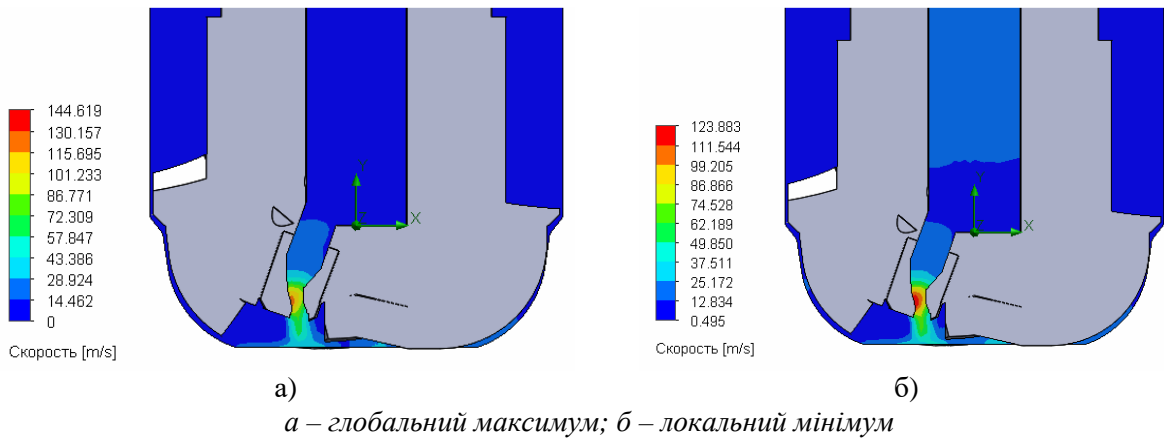


Рисунок 13 – Розподіл швидкості в поперечному перерізі моделі

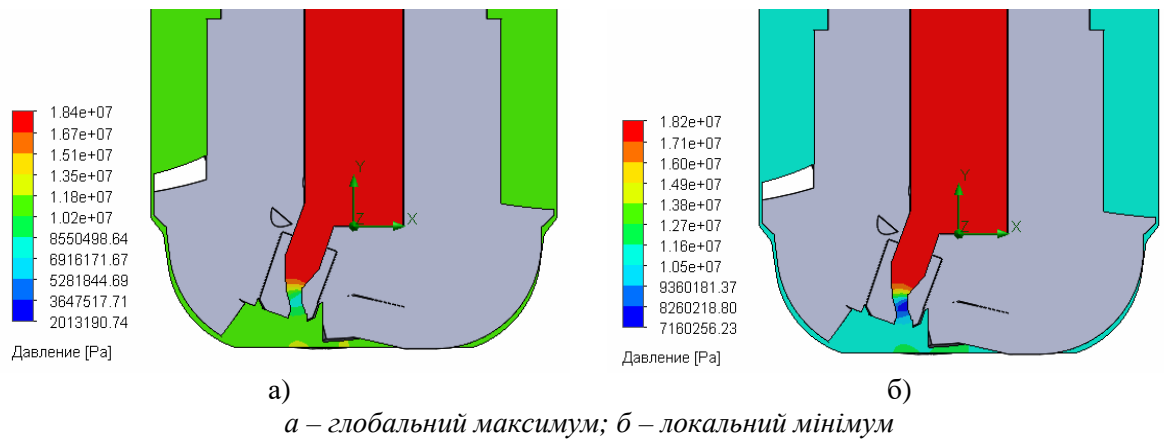


Рисунок 14 – Розподіл тиску в поперечному перерізі моделі

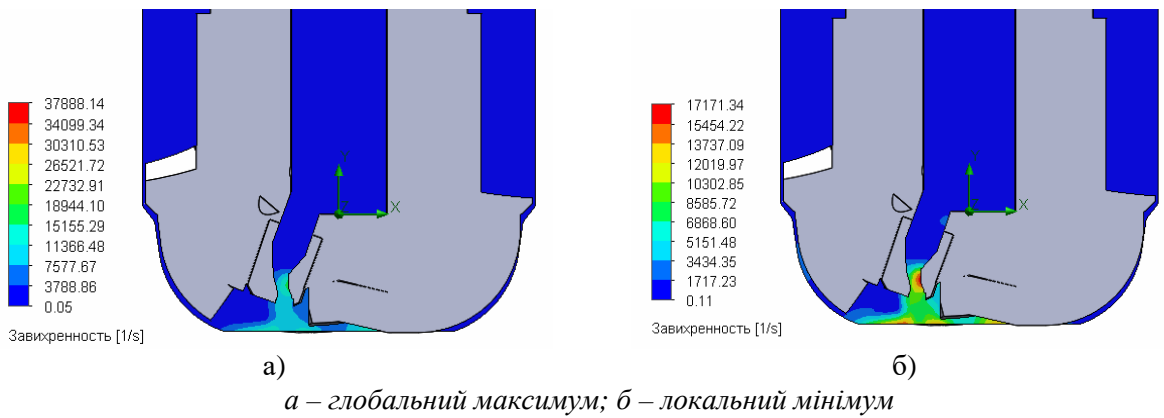


Рисунок 15 – Розподіл завихреності в поперечному перерізі моделі

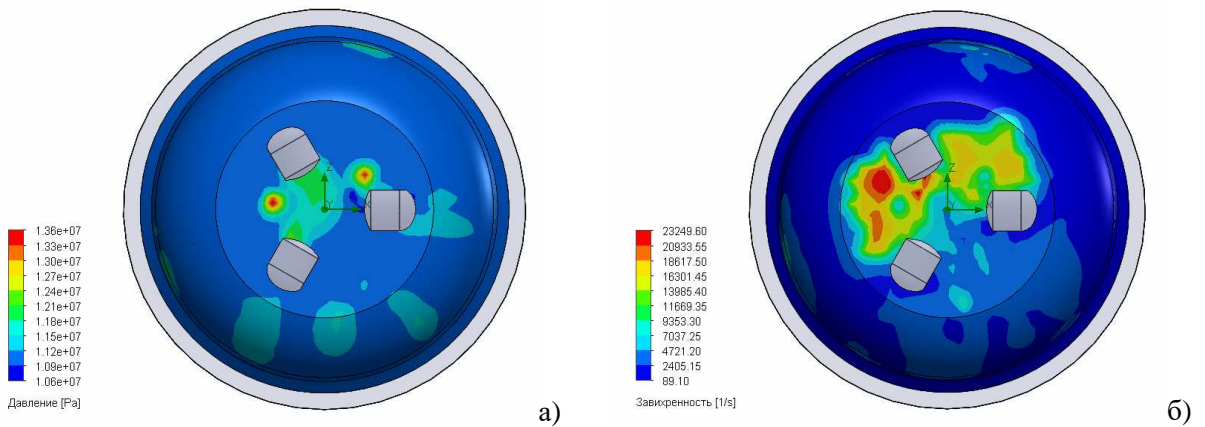


Рисунок 16 – Розподіл тиску (а) та завихреності (б) на вибої моделі свердловини



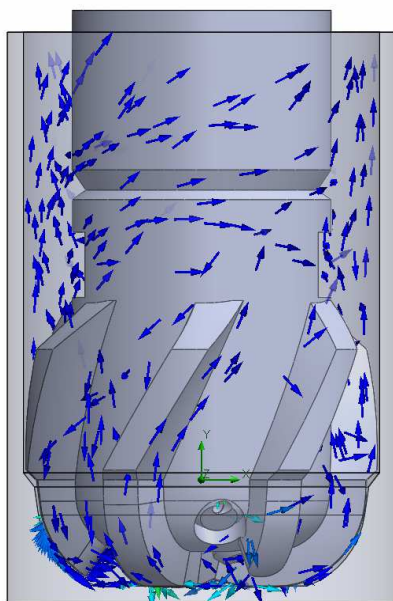


Рисунок 17 – Траєкторії руху потоку бурового розчину

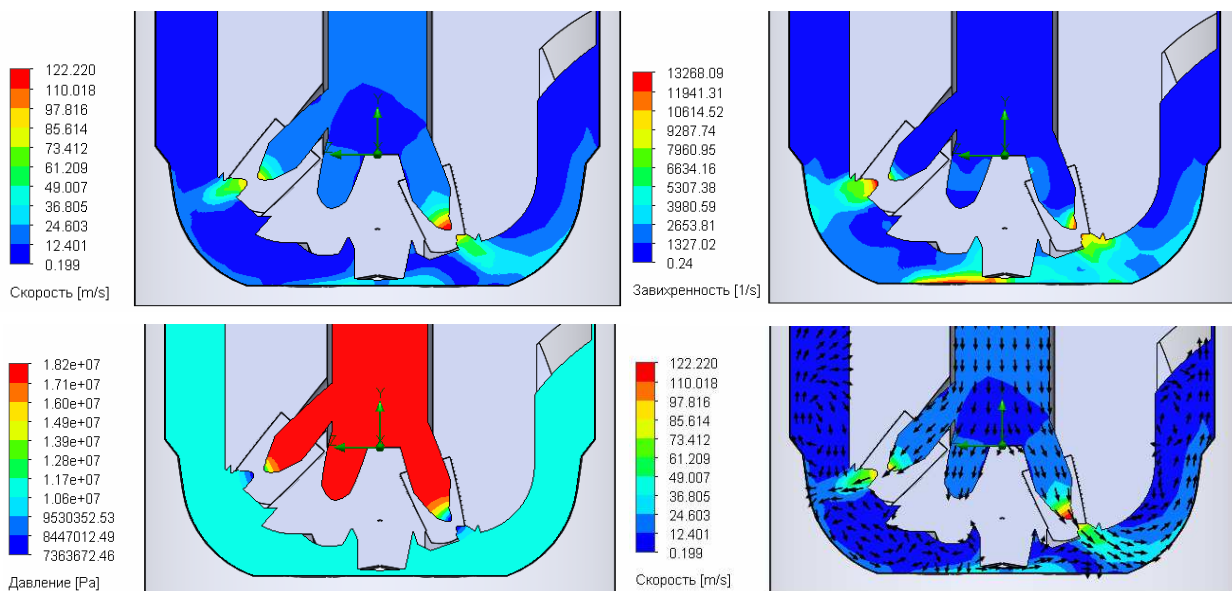


Рисунок 18 – Розподіл швидкості у гідромоніторних насадках

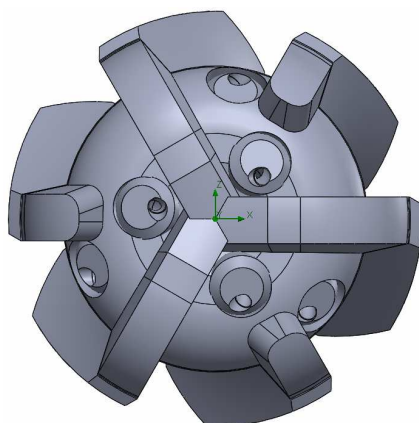


Рисунок 19 – Розміщення гідромоніторних насадок під різними кутами

Отже, запропонована конструкція гідромоніторної насадки порівняно із існуючою має такі переваги:

– створює більшу завихреність потоку рідини, що позитивно впливає на захоплення та винесення шламу;

– дає можливість регулювати напрям руху рідини (особливо важливо для насадок, які розміщені подалі від осі долота), що покращить винесення шламу і запобігатиме повторному потраплянню його на вибій.

У наступних дослідженнях планується провести оптимізацію кута дії струменя бурового розчину та встановити місця і величини знущування гідромоніторних насадок.

### **Висновки**

Сучасні програми, що призначені для імітаційного моделювання гідродинамічних процесів, дають змогу з великою достовірністю визначити необхідні параметри. Проте, точність отриманого результату буде залежати не тільки від налаштувань сітки кінцевих об'ємів, кількості ітерацій, а і від вхідних даних. Тому у статті подано результати проведених імітаційних досліджень гідродинамічних параметрів долота PDC із врахуванням умов його роботи, що наближені до реальних.

Отримані картини розподілу швидкостей, тисків та турбулентності у типовій конструкції долота PDC дозволили зробити ряд висновків та запропонувати нову конструкцію гідромоніторної насадки, яка має такі переваги: більша завихреність потоку та можливість регулювання напрямку руху струменя. Це дозволить покращити процес винесення шламу із вибою та запобігти повторному його потраплянню на озброєння долота.

### **Література**

1. Гусман А.М., Мительман Б.И. Экспериментальное исследование влияния схемы и режима промывки забоя на вынос шлама из зоны долота. *Труды ВНИИБТ. Гидравлика в бурении*. 1979. Вып. 48.
2. Мавлютов М.Р. Разрушение горных пород при бурении скважин. М.: Недра, 1978. 215 с.
3. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа: Учеб. для вузов. М.: Дрофа, 2003. 840 с.
4. Білецький Я.С., Сенюшкович М.В., Михайлюк В.В., Савчук Н.М. Бурова головка з різноорієнтованими гідромоніторними насадками. Позитивне рішення на видачу патенту на корисну модель від 21.08. 2020 р.

### **References**

1. Gusman A.M., Mitelman B.I. Eksperimentalnoe issledovanie vliyaniya shemy i rezhima promyvki zaboya na vyinos shlama iz zony dolota. *Trudy VNIIBT. Gidravlika v burenii*. 1979. Issue. 48. [in Russian]
2. Mavlyutov M.R. Razrushenie gornyyh porod pri burenii skvazhin. M.: Nedra, 1978. 215 p. [in Russian]
3. Loytsyanskiy L.G. Mehanika zhidkosti i gaza: Ucheb. dlya vuzov. M.: Drofa, 2003. 840 p. [in Russian]
4. Biletskyi Ya.S., Seniushkovych M.V., Mykhailiuk V.V., Savchuk N.M. Burova holovka z riznooriientovanymy hidromonitornymy nasadkamy. Pozytyvne rishennia na vydachu patentu na korysnu model vid 21.08. 2020. [in Ukrainian]