

Міністерство освіти і науки України

Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»

На правах рукопису

Книш Максим Ігорович

УДК 622.276.3

**РАЦІОНАЛЬНЕ КОНСТРУЮВАННЯ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ ЩОДО
УМОВ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ОБЛАДНАННЯ ЦИРКУЛЯЦІЙНОЇ СИСТЕМИ
БУРОВОЇ УСТАНОВКИ**

Спеціальність 185 – Нафтогазова інженерія та технології

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії

Науковий керівник:

Савик Василь Миколайович,

доцент, кандидат технічних наук

Полтава – 2025

АНОТАЦІЯ

Книш М.І. Раціональне конструювання та рекомендації щодо умов експлуатації обладнання циркуляційної системи бурової установки. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 185 – нафтогазова інженерія та технології (18 «Виробництво та технології»). – Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка».

У ході дослідження процесів зведення нафтогазових свердловин встановлено тенденцію до поступового зростання обсягів робіт з буріння свердловин, які характеризуються аномально низькими пластовими тисками. Це спричинено значними технічними труднощами, серед яких велике поглинання бурового розчину, ризик закупорювання продуктивного пласта буровим розчином та відсутність очікуваного ефекту. Для уникнення цих ускладнень доцільно застосовувати газорідинні суміші як буровий розчин. Вони мають низку переваг порівняно з традиційними промивальними рідинами та дозволяють ефективно усувати зазначені проблеми. При добуванні важких вуглеводнів з низькими тисками в пластах, для підняття шламу і пролуктів буріння найкраще проявляють себе пінисті розчини. Насамперед сучасний стан застосування технологічного обладнання циркуляційних систем потребує енергоефективних конструктивних рішень, здатних заощаджувати енергетичні витрати на усіх ланках технологічного процесу буріння і зокрема в роботі циркуляційного обладнання. На сьогоднішній день у сфері буріння нафтогазових свердловин з використанням піни не існує обладнання, здатного створювати піну із чітко заданою структурою та дисперсністю. Відсутні дослідження, які б застосовували енергетичний підхід до встановлення взаємозв'язку між якістю піноутворення та оцінювання ефективності роботи

циркуляційної системи. Впреші проведені аналітичні, математичні дослідження функціональних залежностей переміщення струменів рідини, повітря і піни, які визначають раціональні, ефективні режими роботи удосконаленого, модернізованого піногенератора.

Обгрутовано ефективну конструкцію піногенератора, для аномально низьких пластових тисків, яка при нижчих значеннях тиску подачі повітря на вході, забезпечує стабільне піноутворення, що сприяє зниженню експлуатаційних витрат і підвищенню енергоефективності.

Запропоновано використання модернізованого піногенератора для приготування піни. Процес утворення пінистого розчину змодельовано в спеціалізованому програмному середовищі SolidWorks, процеси проходження потоків рідини, повітря та пінистого розчину в піногенераторі. Процес моделювання проводився за тиску на вході в піногенератор 10 та 7,5 МПа, при цьому визначалися зміни величини тиску та швидкості у піногенераторі.

Результати моделювання підтвердили доцільність використання удосконаленого ежекційного пристрою циркуляційної системи бурової установки, використовуючи новий параметр контролю, співвідношення енергій потоків рідини, повітря і піни, при цьому забезпечуються найбільш раціональні режими роботи циркуляційної системи бурової установки. Отримані результати слугують фундаментом для подальшого розвитку піногенераторів, а також для проведення експериментальних і промислових досліджень та випробувань цих пристроїв.

У розділі 1 «Аналіз конструктивних рішень обладнання циркуляційних систем бурових установок» детально проаналізовано сучасні проблеми, що виникають під час буріння свердловин у складних геологічних умовах, зокрема питання ефективності застосування піногенеруючих пристроїв. Основну увагу було приділено оцінці їх конструктивних особливостей, принципів роботи та технологічних обмежень. На основі проведеного аналізу було сформульовано основні недоліки існуючих моделей, які впливають на їхню ефективність і

надійність у реальних польових умовах.

Також проаналізовано класифікацію піногенеруючих пристроїв, яка враховує їхню конструкцію, робочі характеристики та сфери застосування. Окремо були розглянуті перспективи впровадження новітніх матеріалів та інноваційних технологій у розробку та вдосконалення цих пристроїв.

На основі отриманих результатів запропоновано низку рекомендацій щодо оптимізації конструкції піногенеруючих пристроїв. Зокрема, це стосується підвищення їхньої ефективності, зниження енерговитрат і збільшення терміну служби. Проведений аналіз дозволяє окреслити напрямки подальших досліджень у цій сфері, що сприятимуть підвищенню якості бурових робіт у складних умовах.

У розділі 2 «Аналітичні дослідження процесу насичення промивальної рідини повітрям» виконано детальний аналіз поточного стану піногенератора, виявлено кілька значних недоліків у його конструкції та експлуатаційних характеристиках. З метою покращення ефективності роботи піногенератора була розроблена нова конструкція з використанням більш сучасних технологій та матеріалів. Встановлено нові елементи, які дозволяють підвищити рівень автоматизації процесів подачі піни та збільшити кількість виробленої піни в найкоротші терміни. Внесено зміни в систему управління піногенератором, що забезпечує більш точний контроль над кількістю та інтенсивністю подачі піни.

Окрім того, була проведена модернізація деяких компонентів піногенератора, таких як форсунки та клапани, що дозволяє знизити споживання енергії та підвищити надійність у разі тривалої експлуатації. Вивчення динаміки двофазного потоку в камері змішування фокусується на аналізі впливу геометричних параметрів та режимних характеристик. У даній моделі розглядається центральне підведення рідини, що витікає з насадки, з одночасним підведенням струменя повітря з бокових каналів прямокутного перерізу, що приєднується до робочої рідини в камері змішування.

Удосконалено функціональні залежності руху потоків рідини, повітря і

піни та енергоефективності роботи піногенераторів при різних конструктивних параметрах.

Процес змішування відбувається поступово: струмінь робочої рідини розширюється після додавання повітря і на певній відстані від вхідного перерізу стикається зі стінками.

Для розрахунку динаміки цього процесу використовуються рівняння нерозривності струменя, збереження енергії, маси та імпульсу для двофазних потоків. Модель передбачає, що потік повітря не містить вологи, а рідина — повітряних бульбашок. Розрахунки зводяться до визначення впливу геометрії камери змішування, швидкості і температури потоків на процес змішування і створення пінного потоку. У разі змішування повітря і рідини застосовуються різні експериментальні та аналітичні залежності для визначення параметрів змішування, зокрема, таких як довжина камери змішування, ефективність пристрою та інші важливі характеристики.

Для раціонального проектування камери змішування важливо правильно визначити її геометричні параметри, зокрема, довжину початкової та основної ділянки, що дозволяє досягти максимальної ефективності змішування і високого ККД системи.

Результати розрахунків можуть суттєво змінюватися залежно від робочого режиму бурового насоса та діаметрів отворів багатосоплових вставок ежекційного типу. Програмні засоби, зокрема Maple-9.5, застосовуються для виконання чисельних розрахунків і моделювання різних режимів функціонування системи, що дає змогу оцінити параметри процесу змішування та спрогнозувати тиск пінної суміші на виході з камери змішування.

Провівши статистичну обробку результатів вимірювань, математичним методом, графічним відображенням теоретичних залежностей, дозволяє визначити енергетично раціональні режими роботи піногенератора по тиску і подачі рідини та повітря. Обґрунтовано ефективну конструкцію піногенератора, яка при нижчих значеннях тиску подачі забезпечує стабільне піноутворення, що

сприяє зниженню експлуатаційних витрат і підвищенню енергоефективності.

З огляду на постійне зростання вартості енергоресурсів та підвищення екологічних вимог, актуальним є пошук таких технічних рішень, які дозволяють мінімізувати енергоспоживання без втрати ефективності роботи. Особливо це стосується обладнання, що функціонує за допомогою змінного тиску та витрати, де оптимізація робочих режимів безпосередньо впливає на загальну продуктивність та економічність процесу.

Енергоефективність роботи цих пристроїв визначається здатністю утворювати піну з мінімальними втратами енергії при заданих параметрах тиску та витрати на вході й виході. Одним із ключових завдань сучасної інженерної практики є дослідження впливу змін робочих умов – зокрема тиску та витрати рідини – на ефективність функціонування піногенераторів.

Тому, вперше, було запропоновано і застосовано параметр оцінювання енергоефективності піногенератора, його раціональних, енергоефективних режимів роботи, як співвідношення енергій потоків рідини, повітря і піни.

У даній роботі проведено чисельне моделювання процесів, що відбуваються в піногенераторах, за допомогою програмного комплексу FlowSimulation (SolidWorks). На основі отриманих результатів було визначено коефіцієнти енергоефективності при різних режимах роботи, що дозволило ідентифікувати найбільш раціональні параметри експлуатації. Зокрема, досліджено діапазони тиску від 6 до 12 МПа та витрати рідини від 0,001 до 0,025 м³/с. Встановлено, що найменший коефіцієнт енергоефективності спостерігається при витраті рідини 0,001 м³/с і коливається в межах від 1 до 1,09. При збільшенні витрати рідини коефіцієнт енергоефективності зростає і при витраті рідини 0,015 м³/с коливається в межах від 1,25 до 1,59 (при тиску піни 8 МПа). Згідно проведених досліджень це найефективніший режим роботи піногенератора, що є оптимальним з погляду співвідношення енергоспоживання до продуктивності. При подальшому збільшенні витрати рідини коефіцієнт енергоефективності зменшується і при витраті рідини 0,025 м³/с коливається в

межах від 1,14 до 1,45.

Відхилення параметрів від оптимального діапазону, як у бік зменшення, так і збільшення витрати, супроводжується зниженням енергоефективності, що зумовлює необхідність точного регулювання експлуатаційних режимів. Отримані результати мають прикладне значення для удосконалення методів розрахунку й проектування технологічного обладнання, оптимізації енергоспоживання в системах очищення рідин, а також для забезпечення високої екологічної та економічної ефективності виробничих процесів. Запропонований підхід до чисельного моделювання із використанням програмного середовища FlowSimulation (SolidWorks) демонструє високу ефективність для аналізу й оптимізації параметрів гідродинамічного середовища і може бути адаптований до дослідження інших типів обладнання, що функціонують в умовах змінних режимів, що, у свою чергу, відкриває перспективи для створення комплексних енергоощадних технологій у різних галузях промисловості.

У результаті запропонованих змін було досягнуто підвищення продуктивності піногенератора, зменшення ймовірності його поломок та покращення загальної безпеки при використанні обладнання в умовах нафтогазової промисловості.

У **розділі 3** «Дослідження процесів піноутворення п'ятисопловим піногенератором методом комп'ютерного моделювання» проведено дослідження процесу буріння нафтогазових свердловин в умовах аномально низьких пластових тисків, яке пов'язане з певними ускладненнями, такими як великі поглинання бурового розчину, розмивання буровим розчином порід, а також потенційні проблеми з розкриттям продуктивних горизонтів. Для мінімізації цих проблем пропонується використання газорідинних сумішей, зокрема аерованих рідин і піни, що забезпечує значні переваги порівняно з традиційними буровими розчинами.

Важливим елементом для успішного буріння в таких умовах є ефективне

піноутворення, яке можна досягти за допомогою піногенераторів. Однак, для отримання високоякісної піни, необхідно використовувати спеціальні технології змішування рідини з повітрям, оскільки процес піноутворення є складним і залежить від багатьох фізико-хімічних факторів. Найбільш ефективним варіантом є використання багатосоплових піногенераторів, що дозволяє значно покращити процес піноутворення.

Один із найбільш перспективних піногенераторів, що був запропонований в дослідженні, має удосконалену конструкцію та здатність забезпечувати високу ефективність за рахунок поліпшеного змішування рідини та повітря. Комп'ютерні дослідження, проведені за допомогою програмного забезпечення SolidWorks, підтвердили переваги цієї конструкції, що дозволяє створювати піну з заданими параметрами структури та дисперсності.

За допомогою комп'ютерного моделювання досліджено, як рухаються потоки рідини, газу та газорідинної суміші вздовж піногенератора. Зокрема розглянуто, як змінюються тиск і швидкість у поздовжньому перерізі піногенератора при різних значеннях тиску у підвідному патрубку (10 і 7,5 МПа). Аналіз графіків показав, що вдосконалення камери змішування дозволяє помітно знизити максимальну швидкість у пристрої, до вдосконалення 96 м/с, а після 80 м/с — значення швидкості в піногенераторі, близькі до швидкості звуку у рідинно-повітряному розчині. Це дає можливість зменшити довжину камери змішування з 0,2 м до 0,13 м, де і відбувається стрибок ущільнення та утворення піни.

Стрибок ущільнення, як і в базовій конструкції, формується за швидкості руху суміші близько 30 м/с, що забезпечує утворення піни при об'ємній газонаповненості у межах 0,2–0,8. Водночас, згідно з проведеними дослідженнями, суттєвою перевагою модернізованого піногенератора є можливість забезпечення тиску на виході на рівні 10 МПа, при тому що, тиск підведення повітря зменшився з 14 МПа до 12 МПа.

За зміни граничних умов, а саме при зниженні тиску на вході в

ежекільний пристрій до 7,5 МПа, забезпечується тиск вкінці піногенератора на рівні 10 МПа. Крім того, за умови збільшення витрати рідини на вході до 0,02 м/с максимальна швидкість у поздовжньому перерізі піногенератора суттєво зменшується до вдосконалення 177,7 м/с після проведеної модернізації 159 м/с і поступово значення швидкості в піногенераторі наближаються до швидкості звуку в рідинно-повітряному розчині. Це, у свою чергу, дозволяє скоротити довжину камери змішування з 0,2 м до 0,15 м, у якій відбувається стрибок ущільнення та створюється пінистий розчин. Момент остаточного змішування потоків і утворення пінистого розчину, виконується, при швидкості 30 м/с, як і в пристрою до модернізації, але суттєво зменивши енергетичні затрати, а саме зменшення тиску подачі повітря в піногенератор з 27 до 18 МПа.

Загалом, ці розробки спрямовані на покращення ефективності буріння нафтогазових свердловин в умовах з аномально низьким пластовим тиском, що є актуальним для сучасної нафтогазової індустрії. У майбутньому це може призвести до підвищення швидкості буріння, зменшення витрат на хімічні реагенти і покращення результатів геологічних досліджень.

У розділі 4 «Експериментальне визначення параметрів роботи пристрою (буровий майданчик Національного університету «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»)» проводиться перевірки достовірності результатів теоретичних досліджень, проведено експериментальні дослідження модернізованого піногенератора.

Основними параметрами, які визначались в ході експериментальних досліджень, були тиск і подача газу та рідини на вході у піногенератор та тиск і подача піни на виході із пристрою. Тиск піни на виході з піногенератора вимірювався при різних режимах його роботи. Результати дослідження п'ятисоплового піногенератора показані відображено на графічних залежностях. На основі отриманих графічних залежностей значення тиску

рідини на вході у піногенератор при витраті рідини $0,01 \text{ м}^3/\text{с}$ і $0,015 \text{ м}^3/\text{с}$ зроблені порівняння експериментальних досліджень із теоретичними.

Наведені результати вказують на співпадання у високій мірі проведених досліджень із встановлення оптимальних параметрів і режимів роботи обладнання для промивання нафтогазових свердловин пінистими розчинами. Результати експериментальних і теоретичних досліджень виявилися доволі близькими (максимальне відхилення становить $8,33 \%$), а також був отриманий стабільний рівень піноутворення. Це свідчить про відповідність отриманих даних та готовність піногенератора до використання в промислових випробуваннях.

У розділі 5 «Промислові дослідження, випробування удосконаленого піногенератора циркуляційної системи бурової установки» програма та методика промислових випробувань удосконаленого піногенератора передбачають оцінку його ефективності та працездатності в реальних умовах експлуатації, зокрема для промивання свердловин піною. Випробування проводилися на свердловині №1 Майорівської площі, яка має стратегічне значення для нафтогазової промисловості та є ідеальним місцем для тестування нового обладнання. У процесі випробувань визначаються технічні показники піногенератора, такі як можливість його установки на циркуляційну систему, параметри свердловини, тиски рідини, піни та повітря, а також ступінь аерації та густина піни.

Піногенератор працює на принципі змішування рідини та повітря за допомогою спеціального змішувача з камерами попереднього змішування, що дозволяє ефективно створювати пінисту суміш для промивання свердловин. Випробування включали кілька етапів: підготовку піногенератора до роботи, перевірку герметичності з'єднань і запуск системи. Для вимірювання параметрів використовуються манометри, термометри та інші контрольні прилади.

Процедура випробувань полягала у встановленні піногенератора на

обв'язку циркуляційної системи, короткочасній подачі рідини та повітря для перевірки роботи пристрою. Після завершення випробувань проводиться перевірка стану обладнання і очищення його складових елементів. Усі результати заносяться в журнал випробувань, а на основі зібраної інформації складається акт про результати випробувань з рекомендаціями щодо подальшого використання піногенератора.

Процес підготовки до випробувань включає створення пінистого розчину з використанням поверхнево-активної речовини, а також проведення контрольних вимірювань основних параметрів. Під час промислових досліджень піногенератор продемонстрував свою ефективність і безпеку при використанні, що дозволяє рекомендувати його для подальшого застосування на свердловинах.

Ключові слова: піногенератор, пінистий розчин, дисперсність, промивальна рідина, форсунки, динаміка процесу, поверхнево-активна речовина, енергоефективність, циркуляційна система, буріння, потужність, фінішна суміш, тиск розчину в трубопроводі, залишкові запаси, дослідження, бурильна колона, нафтові родовища, збільшення видобутку, важковидобувні запаси, моделювання режимів течії рідин, промивання, виробничі випробування, свердловина.

ABSTRACT

Knysh M.I. Rational design and recommendations for operating conditions of the equipment of the circulation system of a drilling rig. – Qualification scientific work in the form of a manuscript.

Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy in specialty 185 - Oil and Gas Engineering and Technologies (18 "Production and Technologies"). - National University "Poltava Polytechnic named after Yuriy Kondratyuk".

During the study of the processes of oil and gas well construction, a tendency towards a gradual increase in the volume of drilling work on wells characterized by abnormally low formation pressures was established. This is due to significant technical difficulties, including high absorption of drilling fluid, the risk of clogging of the productive formation with drilling fluid, and the lack of the expected effect. To avoid these complications, it is advisable to use gas-liquid mixtures as drilling fluid. They have a number of advantages compared to traditional flushing fluids and allow to effectively eliminate the mentioned problems. When extracting heavy hydrocarbons with low pressures in formations, foam solutions are best suited for lifting cuttings and drilling gaps. First of all, the current state of application of technological equipment of circulation systems requires energy-efficient design solutions capable of saving energy costs at all stages of the drilling process and in particular in the operation of circulation equipment. To date, in the field of drilling oil and gas wells using foam, there is no equipment capable of creating foam with a clearly defined structure and dispersion. There are no studies that would apply an energy approach to establishing the relationship between the quality of foam formation and assessing the efficiency of the circulation system. Analytical, mathematical studies of the functional dependencies of the movement of liquid, air and foam jets have been previously conducted, which determine rational, effective operating modes of an improved, modernized foam generator.

An effective design of a foam generator for anomalously low reservoir pressures has been developed, which at lower values of the air supply pressure at the inlet provides stable foam formation, which contributes to reducing operating costs and increasing energy efficiency.

The use of a modernized foam generator for preparing foam is proposed. The process of foam solution formation was modeled in the specialized SolidWorks software environment, the processes of passing liquid, air and foam solution flows in the foam generator. The modeling process was carried out at pressures at the inlet to the foam generator of 10 and 7.5 MPa, while changes in the pressure and speed in the foam generator were determined.

The modeling results confirmed the feasibility of using an improved ejection device of the drilling rig circulation system, using a new control parameter, the ratio of the energies of the liquid, air and foam flows, while ensuring the most rational operating modes of the drilling rig circulation system. The results obtained serve as a foundation for the further development of foam generators, as well as for conducting experimental and industrial research and testing of these devices.

In section 1, “Analysis of design solutions for equipment for circulation systems of drilling rigs,” a detailed analysis of modern problems that arise during well drilling in difficult geological conditions, in particular the issue of the effectiveness of the use of foam-generating devices, was conducted. The main attention was paid to the assessment of their design features, operating principles and technological limitations. Based on the analysis, the main shortcomings of existing models that affect their efficiency and reliability in real field conditions were formulated.

The classification of foam-generating devices was also analyzed, which takes into account their design, operating characteristics and areas of application. The prospects for introducing new materials and innovative technologies into the development and improvement of these devices were separately considered.

Based on the results obtained, a number of recommendations were proposed

for optimizing the design of foam-generating devices. In particular, this concerns increasing their efficiency, reducing energy consumption and increasing their service life. The analysis conducted allows us to outline areas for further research in this area, which will contribute to improving the quality of drilling operations in difficult conditions.

In section 2, “Analytical studies of the process of saturation of the washing liquid with air,” a detailed analysis of the current state of the foam generator was performed, several significant shortcomings in its design and operational characteristics were identified. In order to improve the efficiency of the foam generator, a new design was developed using more modern technologies and materials. New elements were installed that allow increasing the level of automation of the foam supply processes and increasing the amount of foam produced in the shortest possible time. Changes were made to the foam generator control system, which provides more precise control over the amount and intensity of foam supply. In addition, some components of the foam generator, such as nozzles and valves, were modernized, which allows reducing energy consumption and increasing reliability in the event of long-term operation. The study of the dynamics of the two-phase flow in the mixing chamber focuses on analyzing the influence of geometric parameters and operating characteristics. This model considers the central supply of liquid flowing from the nozzle, with the simultaneous supply of an air jet from the side channels of rectangular cross-section, which is connected to the working fluid in the mixing chamber.

The functional dependences of the movement of liquid, air and foam flows and the energy efficiency of the operation of foam generators at different design parameters have been improved.

The mixing process occurs gradually: the jet of the working fluid expands after the addition of air and at a certain distance from the inlet section comes into contact with the walls.

To calculate the dynamics of this process, the equations of jet continuity,

conservation of energy, mass and momentum for two-phase flows are used. The model assumes that the air flow does not contain moisture, and the liquid does not contain air bubbles. The calculations are reduced to determining the influence of the geometry of the mixing chamber, the speed and temperature of the flows on the mixing process and the creation of a foam flow. In the case of mixing air and liquid, various experimental and analytical dependencies are used to determine the mixing parameters, in particular, such as the length of the mixing chamber, the efficiency of the device and other important characteristics.

For rational design of the mixing chamber, it is important to correctly determine its geometric parameters, in particular, the length of the initial and main sections, which allows achieving maximum mixing efficiency and high system efficiency.

The results of calculations can vary significantly depending on the operating mode of the drilling pump and the diameters of the holes of the ejection-type multi-nozzle inserts. Software tools, in particular Maple-9.5, are used to perform numerical calculations and simulate various operating modes of the system, which allows you to estimate the parameters of the mixing process and predict the pressure of the foam mixture at the outlet of the mixing chamber.

After statistical processing of the measurement results, using a mathematical method and graphical display of theoretical dependencies, it is possible to determine the energy-efficient operating modes of the foam generator in terms of pressure and liquid and air supply. An effective design of a foam generator has been substantiated, which at lower supply pressure values provides stable foam formation, which contributes to reducing operating costs and increasing energy efficiency.

Given the constant increase in the cost of energy resources and increasing environmental requirements, it is relevant to search for such technical solutions that allow minimizing energy consumption without losing efficiency. This is especially true for equipment that operates using variable pressure and flow, where optimization of operating modes directly affects the overall productivity and cost-effectiveness of

the process.

The energy efficiency of these devices is determined by the ability to form foam with minimal energy losses at given pressure and flow parameters at the inlet and outlet. One of the key tasks of modern engineering practice is to study the impact of changes in operating conditions - in particular, pressure and fluid flow - on the efficiency of foam generators.

Therefore, for the first time, a parameter for assessing the energy efficiency of a foam generator, its rational, energy-efficient operating modes, was proposed and applied, as the ratio of the energies of the liquid, air, and foam flows.

In this work, numerical modeling of processes occurring in foam generators was carried out using the FlowSimulation software package (SolidWorks). Based on the results obtained, energy efficiency coefficients were determined for different operating modes, which allowed identifying the most rational operating parameters. In particular, the pressure ranges from 6 to 12 MPa and liquid flow rates from 0.001 to 0.025 m³/s were investigated. It was found that the lowest energy efficiency coefficient is observed at a liquid flow rate of 0.001 m³/s and ranges from 1 to 1.09. With increasing liquid flow rate, the energy efficiency coefficient increases and at a liquid flow rate of 0.015 m³/s it ranges from 1.25 to 1.59 (at a foam pressure of 8 MPa). According to the conducted research, this is the most efficient mode of operation of the foam generator, which is optimal in terms of the ratio of energy consumption to productivity. With a further increase in the liquid flow rate, the energy efficiency coefficient decreases and at a liquid flow rate of 0.025 m³/s it ranges from 1.14 to 1.45.

Deviation of the parameters from the optimal range, both in the direction of decreasing and increasing the flow rate, is accompanied by a decrease in energy efficiency, which necessitates the need for precise regulation of operating modes. The results obtained have applied significance for improving the methods of calculation and design of technological equipment, optimizing energy consumption in liquid purification systems, as well as for ensuring high environmental and economic

efficiency of production processes. The proposed approach to numerical modeling using the FlowSimulation software environment (SolidWorks) demonstrates high efficiency for analyzing and optimizing the parameters of the hydrodynamic environment and can be adapted to the study of other types of equipment operating in variable regimes, which, in turn, opens up prospects for the creation of complex energy-saving technologies in various industries. As a result of the proposed changes, an increase in the productivity of the foam generator, a decrease in the probability of its breakdowns, and an improvement in overall safety when using equipment in the oil and gas industry were achieved.

In section 3, “Study of foaming processes with a five-nozzle foam generator using computer modeling”, a study was conducted of the drilling process of oil and gas wells under conditions of abnormally low formation pressures, which is associated with certain complications, such as large absorption of drilling fluid, erosion of rocks by drilling fluid, as well as potential problems with the disclosure of productive horizons. To minimize these problems, the use of gas-liquid mixtures is proposed, in particular aerated fluids and foam, which provides significant advantages compared to traditional drilling fluids.

An important element for successful drilling in such conditions is effective foaming, which can be achieved using foam generators. However, to obtain high-quality foam, it is necessary to use special technologies for mixing liquid with air, since the foaming process is complex and depends on many physicochemical factors. The most effective option is the use of multi-nozzle foam generators, which allows to significantly improve the foaming process.

One of the most promising foam generators proposed in the study has an improved design and the ability to provide high efficiency due to improved mixing of liquid and air. Computer studies conducted using SolidWorks software confirmed the advantages of this design, which allows you to create foam with specified parameters of structure and dispersion.

Using computer modeling, it was investigated how the flows of liquid, gas and

gas-liquid mixture move along the foam generator. In particular, it was considered how the pressure and speed in the longitudinal section of the foam generator change at different pressure values in the inlet pipe (10 and 7.5 MPa). Analysis of the graphs showed that improving the mixing chamber allows you to significantly reduce the maximum speed in the device, up to an improvement of 96 m/s, and after 80 m/s - the speed values in the foam generator, close to the speed of sound in a liquid-air solution. This makes it possible to reduce the length of the mixing chamber from 0.2 m to 0.13 m, where the compaction jump and foam formation occur.

The compaction jump, as in the basic design, is formed at a mixture speed of about 30 m/s, which ensures foam formation at a volumetric gas filling within 0.2–0.8. At the same time, according to the conducted studies, a significant advantage of the modernized foam generator is the ability to provide an outlet pressure of 10 MPa, while the air supply pressure has decreased from 14 MPa to 12 MPa.

When changing the boundary conditions, namely when the pressure at the inlet to the ejector device is reduced to 7.5 MPa, the pressure at the end of the foam generator is provided at the level of 10 MPa. In addition, if the liquid flow rate at the inlet is increased to 0.02 m/s, the maximum speed in the longitudinal section of the foam generator is significantly reduced to 177.7 m/s, after the modernization of 159 m/s, and gradually the speed values in the foam generator approach the speed of sound in a liquid-air solution. This, in turn, allows you to reduce the length of the mixing chamber from 0.2 m to 0.15 m, in which the compaction jump occurs and a foam solution is created. The moment of final mixing of the flows and the formation of a foam solution is performed at a speed of 30 m/s, as in the device before the modernization, but with a significant change in energy costs, namely, a decrease in the air supply pressure to the foam generator from 27 to 18 MPa.

In general, these developments are aimed at improving the efficiency of drilling oil and gas wells in conditions with abnormally low reservoir pressure, which is relevant for the modern oil and gas industry. In the future, this may lead to increased drilling speed, reduced costs for chemical reagents and improved

geological research results.

In section 4 “Experimental determination of the device operating parameters (drilling site of the National University “Poltava Polytechnic named after Yuriy Kondratyuk”)”, the reliability of the results of theoretical research is checked, experimental research of the modernized foam generator is carried out.

The main parameters that were determined during the experimental research were the pressure and flow of gas and liquid at the inlet to the foam generator and the pressure and flow of foam at the outlet from the device. The pressure of the foam at the outlet from the foam generator was measured at different operating modes. The results of the research of the five-nozzle foam generator are shown in graphical dependences. Based on the obtained graphical dependences of the values of the liquid pressure at the inlet to the foam generator at a liquid flow rate of 0.01 m³/s and 0.015 m³/s, comparisons of experimental research with theoretical ones are made.

The results presented indicate a high degree of coincidence of the conducted studies on establishing the optimal parameters and operating modes of equipment for flushing oil and gas wells with foam solutions. The results of experimental and theoretical studies turned out to be quite close (the maximum deviation is 8.33%), and a stable level of foam formation was also obtained. This indicates the correspondence of the obtained data and the readiness of the foam generator for use in industrial tests.

In section 5 “Industrial research, testing of an improved foam generator for the circulation system of a drilling rig”, the program and methodology for industrial testing of an improved foam generator provide for an assessment of its efficiency and performance in real operating conditions, in particular for washing wells with foam. The tests were conducted at well No. 1 of the Mayorivskaya area, which is of strategic importance for the oil and gas industry and is an ideal place for testing new equipment. During the tests, the technical indicators of the foam generator are determined, such as the possibility of its installation on the circulation system, well parameters, liquid, foam and air pressures, as well as the degree of aeration and foam

density. The foam generator works on the principle of mixing liquid and air using a special mixer with pre-mixing chambers, which allows you to effectively create a foam mixture for washing wells. The tests included several stages: preparing the foam generator for operation, checking the tightness of the connections and starting the system. Manometers, thermometers and other control devices are used to measure parameters.

The test procedure consisted of installing the foam generator on the circulation system harness, short-term supply of liquid and air to check the operation of the device. After the tests are completed, the condition of the equipment is checked and its components are cleaned. All results are entered in the test log, and based on the collected information, a test report is drawn up with recommendations for further use of the foam generator.

The process of preparing for the tests includes the creation of a foam solution using a surfactant, as well as control measurements of the main parameters. During industrial research, the foam generator demonstrated its effectiveness and safety in use, which allows it to be recommended for further use in wells.

Keywords: foam generator, foam solution, dispersity, flushing fluid, nozzles, process dynamics, surfactant, energy efficiency, circulatory system, drilling, power, finishing mix, pipeline pressure, residual reserves, exploration, drill string, oil fields, increased production, difficult-to-produce reserves, fluid flow modeling, flushing, production testing, well.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА, В ЯКИХ НАВЕДЕНІ ОСНОВНІ НАУКОВІ РЕЗУЛЬТАТИ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Determining foaming regularities enabled by a five-nozzle foam generator for drilling technologies under conditions of abnormally low pressures / A. Kaliuzhnyi, P. Molchanov, V. Savyk, **M. Knysh**, R. Yaremiychuk Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2022. Vol. 4, no. 1 (118). P. 72–79. URL: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.262506> (**Scopus**) (Фахове видання) (Q3)

2. Tetiana Surzhko, **Maksym Knysh**, Yuriy Kuzub, Oleksandr Kruchkov, Viacheslav Rubel study of the operating parameters of vibrations of a vibrosieve of the washing liquid purification unit Technology Audit and production Reserves – № 4/1(72), Kharkiv, 2023 pp. 34–39.

DOI: 10.15587/2706-5448.2023.286362 (Copernicus) (Фахове видання)

3. Mathematical and computer identification of the characteristics of oscillation frequency and deformations of the equipment element in the flush purification unit / T. Surzhko, P. Molchanov, S. Hudz, **M. Knysh**, Y. Sribna, L. Hrytsenko, V. Tytarenko, V. Savyk, V. Rubel Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2024. Vol. 4, no. 7 (130). P. 32–40.

URL: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.308937>. (**Scopus**) (Фахове видання) (Q3)

4. Molchanov, P., Surzhko, T., **Knysh, M.**, Sribna, Y., Savyk, V., Novopysmennyi, S., Debre, O., Salenko, Y., Hudz, S., Zakomirnyi, D. (2025). Mathematical and graphical approaches to improve the process of saturation of flushing fluid with air in the circulation system of a drilling rig unit. Technology Audit and Production Reserves, 3 (1 (83)), 00–00.

URL: <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2025.329744>. (**Scopus**) (Фахове видання)

5. **Maksym Knysh**, Tetiana Surzhko, Research of the equipment of the washing liquid purification unit with analysis of the energy efficiency of foam generators in conditions of variable pressure and liquid flow, Integrated Technologies and Energy Saving 2'2025, Kharkiv, 2025, pp. 3–13.

DOI: 10.20998/2078-5364.2025.2.01 (**Фахове видання**)

6. Рациональне конструювання та рекомендації щодо умов експлуатації обладнання циркуляційної системи бурової установки / Т.О. Суржко, П.О. Молчанов, В.М. Савик, **М.І. Книш** // Збірник наукових праць XIV Міжнародної науково-практичної конференції “Академічна й університетська наука: результати та перспективи”, 9 грудня 2021 року – Полтава: Полтавська політехніка 2021.

7. Молчанов П.О., Савик В.М., Ілляшенко Ю.П., Суржко Т.О., **Книш М.І.** (2022). Удосконалення бурових насосів насосно-циркуляційного комплексу бурової установки. sur les matériaux de la iii conférence scientifique et pratique internationale «débats scientifiques et orientations prospectives du développement scientifique» 8 juillet 2022 • Paris, République Française, 151–155.

DOI 10.36074/logos-08.07.2022.04

8. Суржко Т.О., **Книш М.І.**, Ілляшенко Ю. П., Панюта В.Б. Конструювання обладнання циркуляційної системи бурової установки.

XIII Міжнародної науково-практичної конференції «Академічна й університетська наука», Всеукраїнської науково-практичної конференції «Сучасні рецепції світоглядно-ціннісних орієнтирів Григорія Сковороди» 02 грудня 2022 року. Збірник наукових праць. Полтава 2022 Том 2. – с. 168–170.

9. Транспортування водними шляхами блоків бурового обладнання / Василь Савик, Тетяна Суржко, **Максим Книш**, Юрій Ілляшенко // Всеукраїнська науково-практична конференція здобувачів вищої освіти та молодих учених «Логістичне управління та безпека руху на транспорті». Збірник наукових праць – Київ, 2024 С. 56–59 (Стаття)

10. Упровадження ежекторних технологій для підвищення ефективності циркуляційної системи бурової установки / В.М. Савик, П.О. Молчанов, **М.І. Книш** // Тези 74-ї наукової конференції професорів, викладачів, наукових працівників, аспірантів та студентів університету на базі Національного університету «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», Том 2 (Полтава, Полтава, 25 квітня – 21 травня 2022 р.) – Полтава: Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», 2022. С 70–72.

11. Покращення характеристик бурових насосів / В.М. Савик, Ю.П. Ілляшенко, **М.І. Книш** // Тези II міжнародної науково-практичної конференції “Енергоощадні машини і технології”, 17-19 травня 2022 року – Київ: Київський національний університет будівництва і архітектури, 2022.

12. Модернізація обладнання блоку очистки промивальної рідини / В.М. Савик, П.О. Молчанов, Петро Молчанов, Тетяна Суржко, **Максим Книш** // Тези Київський національний університет будівництва і архітектури кафедра машин і обладнання технологічних процесів III Міжнародна науково-практична конференція «Енергоощадні машини і технології» 17-19 травня Київ 2022. С 74 – 77.

13. Використання LMS MOODLE в дистанційному навчанні / В.М. Савик, П.О. Молчанов, Суржко Т.О., **Книш М.І.**, Ю.П. Ілляшенко // Тези всеукраїнської науково-практичної інтнет-конференції «Формування цифрового освітнього середовища професійного розвитку фахівців в умовах відкритого університету післядипломної освіти» 21-22 червня Київ 2022. С 69–70

14. Енергетичні установки нососо-циркуляційної системи / Т.О. Суржко, **М.І. Книш**, В.Б. Панюта, Ю.П. Ілляшенко // Тези XVI Міжнародній науково-технічній конференції «ABIA-2023», 18-20 квітня 2023 року Київ. С 69–70.

15. ОПТИМІЗАЦІЯ КОНСТРУКЦІЙ ПІНОГЕНЕРАТОРІВ НАСОСНО-ЦИРКУЛЯЦІЙНОЇ СИСТЕМИ БУРОВОЇ УСТАНОВКИ / В.М. Савик,

М.І. Книш, Т.О. Суржко // Тези 75-ї наукової конференції професорів, викладачів, наукових працівників, аспірантів та студентів університету на базі Національного університету «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», (Полтава, у період 01 травня по 26 травня 2023 року – Полтава: Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», 2023. С 101–102.

16. Методичні вказівки до виконання практичних робіт із курсу «Монтаж бурового та нафтопромислового обладнання». Укладачі: Савик В.М., Молчанов П.О., Калюжний А.П., Суржко Т.О., **Книш М.І.** – Полтава: НУПП імені Юрія Кондратюка, 2021. – 43 с.

17. Енергетичні установки нососо-циркуляційної системи / Т.О. Суржко, **М.І. Книш**, В.Б. Панюта, Ю.П. Ілляшенко // Тези XVI Міжнародна науково-технічна конференція “ABIA-2023” 18-20 квітня 2023 року – Київ: 2023. С 69–70.

18. Використання елементів дистанційного навчання в освітньому процесі / Василь Савик, Тетяна Суржко, **Максим Книш**, Юрій Ілляшенко // II Всеукраїнська науково-практична інтернет-конференція «Формування цифрового освітнього середовища професійного розвитку фахівців в умовах відкритого університету післядипломної освіти», 25-26 травня 2023 року Київ: 2023.

19. Математичне врахування коливань вібраційного сита блоку очистки промивальної рідини / В.М. Савик, **М.І. Книш**, Т.О. Суржко, Ю.П. Ілляшенко // Тези 76-ї наукової конференції професорів, викладачів, наукових працівників, аспірантів та студентів університету на базі Національного університету «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», (Полтава, у період з 13 травня по 24 травня 2024 року – Полтава: Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», 2024. С. 70–71.

Зміст

ВСТУП.....	28
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ КОНСТРУКТИВНИХ РІШЕНЬ ОБЛАДНАННЯ ЦИРКУЛЯЦІЙНИХ СИСТЕМ БУРОВИХ УСТАНОВОК	36
1.1 Сучасні виклики та інноваційні підходи в застосуванні ефективних систем циркуляції бурового розчину	36
1.2 Розробка та вдосконалення піногенеруючих пристроїв для ефективного буріння свердловин в умовах високих тисків	38
1.3 Використання піногенераторів у циркуляційних системах бурових установок	49
1.4 Аналіз досліджень, спрямованих на підвищення ефективності роботи піногенеруючих пристроїв для очищення промивальної рідини	51
1.5 Висновки до розділу 1. Мета та задачі дослідження.....	53
РОЗДІЛ 2 АНАЛІТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ НАСИЧЕННЯ ПРОМИВАЛЬНОЇ РІДИНИ ПОВІТРЯМ.....	56
2.1 Визначення ефективності роботи піногенераторів у циркуляційній системі бурового комплексу	60
2.2 Аналітичне визначення динаміки утворення пінистої суміші, враховуючи зміни геометрії та раціональних режимів піногенератора.....	62
2.3 Дослідження обладнання блоку очистки промивальної рідини з аналізом енергоефективності піногенераторів за умов змінного тиску та витрат рідини.....	85
2.4 Висновки до розділу 2	95
РОЗДІЛ 3 ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ ПІНОУТВОРЕННЯ П'ЯТИСОПЛОВИМ ПІНОГЕНЕРАТОРОМ МЕТОДОМ КОМП'ЮТЕРНОГО МОДЕЛЮВАННЯ	97
3.1 Підвищення ефективності використання пінистих систем у процесах буріння нафтогазових свердловин	98
3.2 Обґрунтування і постановка завдань комп'ютерного моделювання досліджень	100

3.3 Мета та задачі комп'ютерного моделювання досліджень.....	102
3.4 Матеріали та методи комп'ютерного моделювання досліджень	102
3.5 Результати комп'ютерного моделювання досліджень піногенератора, для визначення раціональних, енергоефективних режимів роботи циркуляційної системи бурової установки	109
3.5.1 Комп'ютерне моделювання досліджень ефективності роботи	109
модернізованого піногенератора, подача рідини в піногенератор з тиском 10 МПа	109
3.5.2 Моделювання дослідження ефективності роботи модернізованого піногенератора при тиску повітря на вході у підвідному патрубку 7,5 МПа.....	114
3.6 Аналіз результатів комп'ютерного моделювання, процесів утворення піни в модернізованому піногенераторі.....	119
3.7 Висновки до розділу 3	122
РОЗДІЛ 4 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ РОБОТИ ПРИСТРОЮ (БУРОВИЙ МАЙДАНЧИК НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ «ПОЛТАВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА ІМЕНІ ЮРІЯ КОНДРАТЮКА»).....	123
4.1 Програма і методика експериментальних досліджень, удосконаленого піногенератора ...	123
4.1.1 Мета експериментальних досліджень.....	125
4.1.2 Опис, місця експериментальних досліджень	125
4.1.3 Процедура і послідовність експериментальних досліджень дослідного зразка	127
4.1.4 Дослідження стійкості піни	131
Висновки до розділу 4.....	132
РОЗДІЛ 5 ПРОМИСЛОВІ ДОСЛІДЖЕННЯ, ВИПРОБУВАННЯ УДОСКОНАЛЕНОГО ПІНОГЕНЕРАТОРА ЦИРКУЛЯЦІЙНОЇ СИСТЕМИ БУРОВОЇ УСТАНОВКИ	134
5.1 Програма і методика промислових досліджень, випробувань удосконаленого піногенератора.....	134

5.1.1 Мета промислових досліджень, випробувань.....	136
5.1.2 Опис, місця промислових досліджень, випробувань (свердловина №1 Майорівської площі).....	136
5.1.3 Номенклатура технічних показників, які необхідно визначити в процесі випробувань ..	138
5.1.4 Опис дослідного зразка, для проведення випробувань	138
5.1.5 Принцип роботи дослідного зразка - піногенератора	139
5.1.6 Прилади контролю параметрів, що визначаються при випробуванні дослідного зразка	140
5.1.7 Процедура і послідовність випробувань дослідного зразка.....	140
5.1.8 Вимоги до техніки безпеки при випробуванні.....	142
5.1.9 Обробка і оформлення результатів випробування	143
5.2 Підготовка устаткування до промислових випробувань	143
5.3 Промислові дослідження і випробування удосконаленого піногенератора.....	144
Висновки до розділу 5.....	145
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	152
Додатки	168
Додадок А (Програма і методика промислових випробувань удосконаленого піногенератора циркуляційної системи бурової установки).....	169
Додадок Б (АКТ промислових випробувань на свердловині №1 Майорівської площі удосконаленого піногенератора циркуляційної системи бурової установки).....	170
Додадок В (АКТ про впровадження результатів дисертаційної роботи у навчальний процес Національного університету «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»)	171
Додадок Г (ДОВІДКА про впровадження дисертаційного дослідження ТОВ «НАФТОПРОМИСЛОВА ГЕОЛОГІЯ»)	172

ВСТУП

Актуальність теми. Розвиток нафтогазовидобувної галузі є ключовим завданням для забезпечення енергетичної незалежності України, особливо в умовах зростаючих вимог до ефективності, екологічності та безпеки видобувних технологій. Сучасні виклики, пов'язані зі складними геологічними умовами та аномально низькими пластовими тисками, потребують впровадження інноваційних підходів і вдосконалення обладнання, зокрема піногенеруючих пристроїв, які відіграють важливу роль у бурінні свердловин [1].

Вдосконалення піногенераторів шляхом оптимізації їх конструкції, впровадження багатоступеневих камер змішування, завихрювачів пінної суміші та нових зносостійких матеріалів дозволяє забезпечити ефективну циркуляцію промивальної рідини, стабільність утворення піни та якісне очищення свердловин. Це особливо важливо за умов високих тисків і агресивних середовищ, де стандартні технології виявляються недостатньо ефективними [70].

Результати досліджень і випробувань модернізованих піногенераторів підтверджують їхню здатність знижувати енергетичні витрати, підвищувати продуктивність бурових робіт і забезпечувати екологічну безпеку технологічних процесів. Встановлена відповідність конструкцій сучасним вимогам до надійності й ефективності відкриває можливості для їх широкого впровадження в нафтогазовій промисловості та масштабування на інші галузі [72].

Таким чином, робота є актуальною, оскільки сприяє вирішенню критично важливих завдань підвищення ефективності та екологічної безпеки бурових робіт, забезпечуючи енергетичну незалежність України та конкурентоспроможність її нафтогазовидобувної галузі.

Мета і задачі дослідження. Метою даної роботи є удосконалення та впровадження піногенеруючих пристроїв для ефективної роботи в насосно-циркуляційних системах бурових установок, що забезпечують стабільне піноутворення, оптимізацію витрат енергії, підвищення продуктивності бурових робіт і зниження впливу на навколишнє середовище.

Задачі дослідження:

- провести аналіз існуючих конструкцій піногенеруючих пристроїв та визначити їх основні недоліки при експлуатації за умов високих тисків і складних геологічних умов;
- визначити параметри ефективності роботи піно генеруючих пристроїв;
- встановити залежності ефективності змішування потоків у камері змішування від геометричних параметрів пристрою та співвідношення між подачею повітря і рідини;
- провести експериментальні дослідження роботи пристрою та обґрунтувати величину раціональних параметрів, з точки зору максимальної ефективності піногенератора;
- дослідити ефективність роботи модернізованих піногенераторів у реальних умовах експлуатації, оцінюючи їх вплив на енергетичні витрати, якість утворення піни та відповідність екологічним стандартам;

Об'єкт дослідження – робочі процеси технологічного обладнання насосно-циркуляційних систем бурових установок для утворення піни.

Предмет дослідження – ефективність ежекційних піногенераторів в насосно-циркуляційних системах бурових установок для буріння нафтогазових свердловин.

Методи дослідження. Методи дослідження представляють комплекс, який містить:

- аналіз існуючих конструкцій: оцінка конструкцій піногенеруючих пристроїв, їх адаптація до високих тисків та агресивних середовищ;

- математичне моделювання: використання математичних моделей для вивчення залежностей між геометричними параметрами, витратами повітря і рідини, тиском і ефективністю роботи піно генераторів;
- моделювання процесу піноутворення з використанням основних законів гідромеханіки та критеріїв подібності (законів балансу енергії, неперервності потоку, збереження кількості руху, а також використання критерію Лапласа, чисел Вебера та Маха, рівняння Лишевського);
- порівняльний аналіз результатів моделювання: оцінка ефективності піногенераторів із різними конструктивними змінами, зокрема з новими завихрювачами і модифікованими вставками;
- визначення раціональних параметрів пристроїв: дослідження геометричних параметрів піногенераторів і впливу на їхню ефективність, для покращення розподілу потоків і мінімізації енергетичних втрат;
- комп'ютерне моделювання, для оптимізації конструкції піногенератора (SolidWorks);
- експериментальне визначення параметрів роботи пристрою (буровий майданчик Національного університету «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»);
- статистична обробка результатів вимірювань, математичним методом;
- промислові дослідження, випробування, для підтвердження ефективності розробленої системи (свердловина №1 Майорівська площа).

Наукова новизна одержаних результатів полягає у тому що:

1. Отримано нові залежності ефективних раціональних режимів роботи пристроїв циркуляційної системи бурової установки, які базуються на:
 - а.) вперше застосованому енергетичному підході до встановлення взаємозв'язку між якістю піноутворення та оцінюванні ефективності роботи піногенератора;

б.) вперше застосовано параметр оцінювання енергоефективності, як співвідношення енергії потоків рідини, повітря і піни.

2. Удосконалено залежності руху потоків рідини, повітря і піни та ефективності роботи піногенераторів при різних конструктивних параметрах;

3. Отримано нові дані залежностей тиску піни на виході від геометричних та режимних характеристик піногенераторів, що дає можливість точно прогнозувати їхню ефективність на етапі проектування.

Практичне значення отриманих результатів. Підвищення ефективності бурових робіт: вдосконалені піногенератори дозволяють забезпечити більш стабільне і ефективне утворення піни, що покращує циркуляцію промивальної рідини, транспортування вибуреної породи, охолодження бурового обладнання та стабілізацію свердловини. Це сприяє підвищенню продуктивності бурових установок.

Отримані за результатами теоретичних досліджень, а також підтверджена достовірність результатів, промисловими дослідженнями, коефіцієнтів енергоефективності піногенератора, при зміні робочих умов, дають можливість визначення раціональних режимів роботи піногенератора по тиску і подачі рідини і повітря, при цьому забезпечуючи найбільший коефіцієнт енергоефективності.

Зниження енергетичних витрат: завдяки модернізації конструкцій піногенераторів і зниженню тиску повітря на вході, досягнуто значного зменшення енергетичних витрат при збереженні ефективності. Це дозволяє знизити експлуатаційні витрати і покращити енергоефективність процесів буріння.

Покращення екологічної безпеки: використання сульфанола як основного реагенту, що відповідає сучасним екологічним стандартам, сприяє зменшенню негативного впливу на навколишнє середовище. Це підвищує екологічну безпеку бурових процесів.

Оптимізація роботи бурових установок: завдяки вдосконаленим конструкціям піногенераторів, інтегрованим у циркуляційні системи бурових установок, значно покращується якість очищення бурового розчину і забезпечується його регенерація, що сприяє зменшенню витрат на обслуговування та збільшенню терміну служби обладнання.

Підвищення надійності та безпеки: промислові випробування підтвердили, що модернізовані піногенератори працюють стабільно та надійно в реальних умовах експлуатації, що забезпечує їх тривалу і безпечну роботу на бурових установках.

Промислові випробування удосконаленого піногенератора: підтвердження надійності та ефективності удосконаленого піногенератора в реальних умовах експлуатації, що включає забезпечення стабільної подачі піни в циркуляційну систему при високих вимогах до густини і стабільності піни.

Можливість впровадження у виробничий процес: результати досліджень і випробувань створюють передумови для широкого впровадження удосконалених піногенераторів у нафтогазовій галузі, що дозволить підвищити ефективність видобутку вуглеводнів і знизити витрати на буріння.

Використання результатів роботи. Результати дисертаційних досліджень впроваджено в освітньо-наукову програму 185 «Нафтогазова інженерія та технології», зокрема в навчальному курсі «Машини та обладнання для буріння свердловин» та «Монтаж бурового та нафтогазопромислового обладнання» для підготовки бакалаврів (перший рівень вищої освіти) (акт про впровадження результатів, додаток В).

Результати аналітичних досліджень, математичних розрахунків, комп'ютерного моделювання та промислових досліджень, випробувань використовуються підприємством ТОВ «НАФТОПРОМИСЛОВА ГЕОЛОГІЯ», для підвищення ефективності бурових робіт, зберігаючи при цьому найбільші коефіцієнти енергоефективності (довідка про впровадження результатів, Додаток Г)

Особистий внесок здобувача. На основі аналітичних досліджень вперше сформовано застосування параметру оцінювання енергоефективності, як співвідношення енергій потоків рідини, повітря і піни; досліджено математичними розрахунками, раціональні параметри піногенератора, їх геометричних розмірів і впливу на їхню ефективність, для покращення розподілу потоків і мінімізації енергетичних втрат, під час проведення бурових робіт; статистичною обробкою результатів математичних досліджень, визначено найефективніший режим роботи удосконаленого піногенератора; проведено експериментальне визначення параметрів роботи піногенератора на буровому майданчику Національного університету «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»; використовуючи аналітичні, експериментальні дослідження та результати досліджень комп'ютерного моделювання процесів змішування потоків у камері змішування ежекційного піногенератора, проведено промислові дослідження, що підтвердили ефективність роботи циркуляційної системи бурової установки, з раціональними, ефективними режимами роботи.

Здобувачем особисто удосконаленого піногенератор, введено параметр оцінювання енергоефективності, як співвідношення енергій потоків рідини, повітря і піни.

Результати теоретичних що містяться в дисертації, отримано автором самостійно. У публікаціях у співавторстві особистий внесок здобувача полягає в проведенні теоретичних досліджень, аналізі отриманих даних, розробленні конструкції випробувальної установки та виконанні числових обчислень основних параметрів, виконанні теоретичних досліджень, розрахунку та конструювання форми.

Апробація роботи. Основні положення дисертаційної роботи доповідались та обговорювались на:

1. XIV Міжнародна науково-практична конференція “Академічна й університетська наука: результати та перспективи”, 9 грудня 2021 року.

2. 74-я наукова конференція професорів, викладачів, наукових працівників, аспірантів та студентів університету на базі Національного університету «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», 2022.

3. II міжнародна науково-практична конференція “Енергоощадні машини і технології”, 17-19 травня 2022 року – Київ: Київський національний університет будівництва і архітектури, 2022.

4. 74-я наукова конференція професорів, викладачів, наукових працівників, аспірантів та студентів університету на базі Національного університету «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка» (2022).

5. Київський національний університет будівництва і архітектури кафедра машин і обладнання технологічних процесів III Міжнародна науково-практична конференція «Енергоощадні машини і технології» 17 - 19 травня Київ 2022.

6. III conférence scientifique et pratique internationale «débats scientifiques et orientations prospectives du développement scientifique» 8 juillet 2022 • Paris, République Française. (III міжнародна науково-практична конференція «наукові дискусії та перспективні напрямки розвитку науки» 8 липня 2022 року • Париж, Французька Республіка, 151–155. DOI 10.36074/logos-08.07.2022.04).

7. Всеукраїнська науково-практична інтнет-конференція «Формування цифрового освітнього середовища професійного розвитку фахівців в умовах відкритого університету післядипломної освіти» 21-22 червня Київ 2022.

8. XVI Міжнародній науково-технічній конференції «ABIA-2023», 18-20 квітня 2023 року Київ.

9. 75-а наукової конференції професорів, викладачів, наукових працівників, аспірантів та студентів університету на базі Національного університету «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», (Полтава, у

період 01 травня по 26 травня 2023 року – Полтава: Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», 2023.

10. II Всеукраїнська науково-практична інтернет-конференція «Формування цифрового освітнього середовища професійного розвитку фахівців в умовах відкритого університету післядипломної освіти», 25-26 травня 2023 року Київ: 2023.

11. Всеукраїнська науково-практична конференція здобувачів вищої освіти та молодих учених «Логістичне управління та безпека руху на транспорті».тема Транспортування водними шляхами блоків бурового обладнання – Київ, 2024.

12. 76-а наукової конференції професорів, викладачів, наукових працівників, аспірантів та студентів університету на базі Національного університету «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», (Полтава, у період з 13 травня по 24 травня 2024 року – Полтава.

Публікації. За темою дисертації опубліковано 19 наукових праць, із них 5 у фахових виданнях та 3 статті у Scopus.

Структура й обсяг дисертації. Дисертація складається із вступу, п'ятих розділів, висновків, списку використаних джерел (122 найменування), додатків, вміщує 54 рисунків, 8 таблиць, загальний обсяг роботи складає 180 сторінка. Дисертація виконана під науковим керівництвом кандидата технічних наук, доцента Савика Василя Миколайовича, якому здобувач висловлює глибоку подяку за постановку задачі, постійну увагу, допомогу, корисні поради і всебічну підтримку.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ КОНСТРУКТИВНИХ РІШЕНЬ ОБЛАДНАННЯ ЦИРКУЛЯЦІЙНИХ СИСТЕМ БУРОВИХ УСТАНОВОК

1.1 Сучасні виклики та інноваційні підходи в застосуванні ефективних систем циркуляції бурового розчину

Нафта і газ, як основні енергоносії, відіграють ключову роль у розвитку економіки держав. Продукти переробки нафти і газу виступають ключовою основою паливної системи транспортних засобів, а також слугують важливою сировиною для хімічної галузі. У ході нафтопереробки отримують широкий спектр продуктів, включаючи бензин, гас, дизельне паливо, змащувальні оливи, мазут, парафін, бітум та інші похідні нафтопродукти, які знаходять широке застосування в різних сферах промисловості [8].

Зростання попиту на нафту і газ призвело до необхідності розробки родовищ із більш глибокими покладами, що ускладнює процес видобутку через високов'язкі властивості нафти, агресивні середовища та значний вміст води. Розробка таких родовищ часто здійснюється у віддалених і геологічно складних регіонах із несприятливими умовами для роботи, що зумовлює додаткові технічні виклики [1, 2, 5].

Сучасний етап розвитку нафтогазовидобувної галузі характеризується потребою в інноваційних технологічних процесах, які забезпечують ефективний видобуток у складних умовах. Для цього розробляються нові машини та обладнання, без яких продуктивна експлуатація таких родовищ є неможливою.

Подальший розвиток галузі залежить від залучення інвестицій та впровадження національних програм, спрямованих на розробку нових родовищ вуглеводнів. Реалізація цих заходів можлива за умови забезпечення галузі

необхідним обладнанням, яке відповідає сучасним стандартам надійності та продуктивності [29, 71].

Технологічні процеси буріння свердловин значною мірою залежать від кваліфікації фахівців і ефективності роботи бурового обладнання. Промислові спостереження підтверджують, що якість промивальної рідини істотно впливає на терміни освоєння свердловини та обсяги припливу нафти чи газу. Відомі випадки, коли використання неякісного глинистого розчину унеможливило отримання припливу нафти, тоді як застосування інших рідин забезпечувало високі дебіти свердловин [3, 8].

Насамперед сучасний стан застосування технологічного обладнання циркуляційних систем потребує обґрунтування енергоефективних конструктивних рішень, здатних заощаджувати енерговитрати на усіх ланках технологічного процесу буріння і зокрема в роботі циркуляційного обладнання.

У вітчизняних науково-практичній діяльності щодо удосконалення засобів піноутворення наразі не приділялось достатньої уваги. Існуючі дослідження проводились переважно в країні агресорів.

Інші дослідження проводились вченими США та західної Європи у 80-х роках минулого століття.

Промивальні рідини виконують такі основні функції:

1. очищення вибою від породи та транспортування її на поверхню;
2. забезпечення достатнього гідростатичного тиску для запобігання флюїдопроявам;
3. утримання часток породи у зваженому стані при зупинці циркуляції;
4. охолодження та змащування бурового обладнання;
5. запобігання обваленню порід зі стінок свердловини;
6. передача енергії до вибійних двигунів [18, 21].

У процесі буріння промивальна рідина забруднюється частинками вибуреної породи, що призводить до зниження ефективності буріння. Зокрема,

підвищення вмісту твердої фази на 1% може знижувати продуктивність доліт на 7–10% [16, 20]. Абразивна дія твердих частинок прискорює зношення обладнання, що збільшує витрати на ремонт і негативно впливає на економічні показники буріння.

Таким чином забезпечення належної якості промивальних рідин очисні пристрої повинні ефективно видаляти забруднення, зокрема частинки розміром понад 5 мкм. Пропускна здатність очисного обладнання має відповідати максимальній продуктивності насосів [29, 32].

1.2 Розробка та вдосконалення піногенеруючих пристроїв для ефективного буріння свердловин в умовах високих тисків

Піногенератор є спеціалізованим пристроєм, призначеним для утворення піни, що використовується під час буріння та освоєння свердловин. Основна функція пристрою полягає у створенні стабільної піни, яка полегшує винесення вибуреної породи на поверхню, забезпечує її ефективне очищення, а також сприяє стабільній циркуляції промивальної рідини у свердловині. Завдяки піні зменшується навантаження на бурильний інструмент, поліпшується продуктивність процесу, і мінімізується ризик виникнення аварійних ситуацій.

За конструктивними характеристиками піногенератори поділяються на такі основні типи:

1. пристрої, у яких процес піноутворення здійснюється за рахунок багаторазових зіткнень повітряного потоку з піноутворюючою рідиною. У таких пристроях утворення піни відбувається через постійне взаємодію повітря з рідиною, що забезпечує утворення дрібних бульбашок;

2. пристрої, у яких піноутворення здійснюється шляхом барботування повітря через піноутворюючу рідину. Процес утворення піни базується на принципі барботажу, коли повітряні потоки проходять через шар рідини, збагачуючи її бульбашками повітря;

3. пристрої, у яких піноутворення здійснюється під тиском шляхом розпилення рідини через розпилювач на сітчасту поверхню. У цьому випадку піна утворюється внаслідок подачі піноутворюючої суміші через сітчастий розпилювач, що сприяє рівномірному розподілу бульбашок у рідині;

4. пристрої, у яких змішування повітря і піноутворюючої рідини здійснюється за допомогою обертальних лопаток або турбін. У таких піногенераторах турбіни або лопатки приводяться в рух автоматичними приводами чи стиснутим повітрям, яке надходить безпосередньо до пристрою [21–23].

На сьогодні існує велика кількість різноманітних конструкцій піногенеруючих пристроїв. У більшості типових моделей піна утворюється на сітчастих елементах або при потраплянні суміші в перфоровані трубки. Такі пристрої добре зарекомендували себе під час буріння неглибоких свердловин, зокрема геологорозвідувальних, інженерно-геологічних, геофізичних та інших. Структурні схеми типових піногенеруючих пристроїв наведено на рисунку 1.1.

Проте для буріння глибоких свердловин, які характеризуються складними умовами експлуатації, необхідно використовувати спеціалізовані дотискні пристрої, здатні витримувати підвищені навантаження. Це пов'язано з тим, що під час глибокого буріння промивальна рідина зазвичай подається під високим тиском (від 5 до 10 МПа і більше).

Однією з ключових проблем, що обмежують ефективність використання стандартних піногенеруючих пристроїв, є їхня непрацездатність за умов високого тиску рідини. Конструкції, що функціонують на тисках до 1,0 МПа, не здатні забезпечувати стабільну роботу при тисках 5–10 МПа, які характерні для сучасних глибоких свердловин. Це зумовлює потребу в модернізації існуючих пристроїв або розробці нових, які можуть функціонувати в екстремальних умовах.

Таким чином, підвищення ефективності піногенераторів для застосування у глибокому бурінні вимагає як удосконалення їх конструкції, так і

впровадження новітніх матеріалів і технологій, що здатні забезпечувати стійкість до високих тисків та агресивних середовищ.

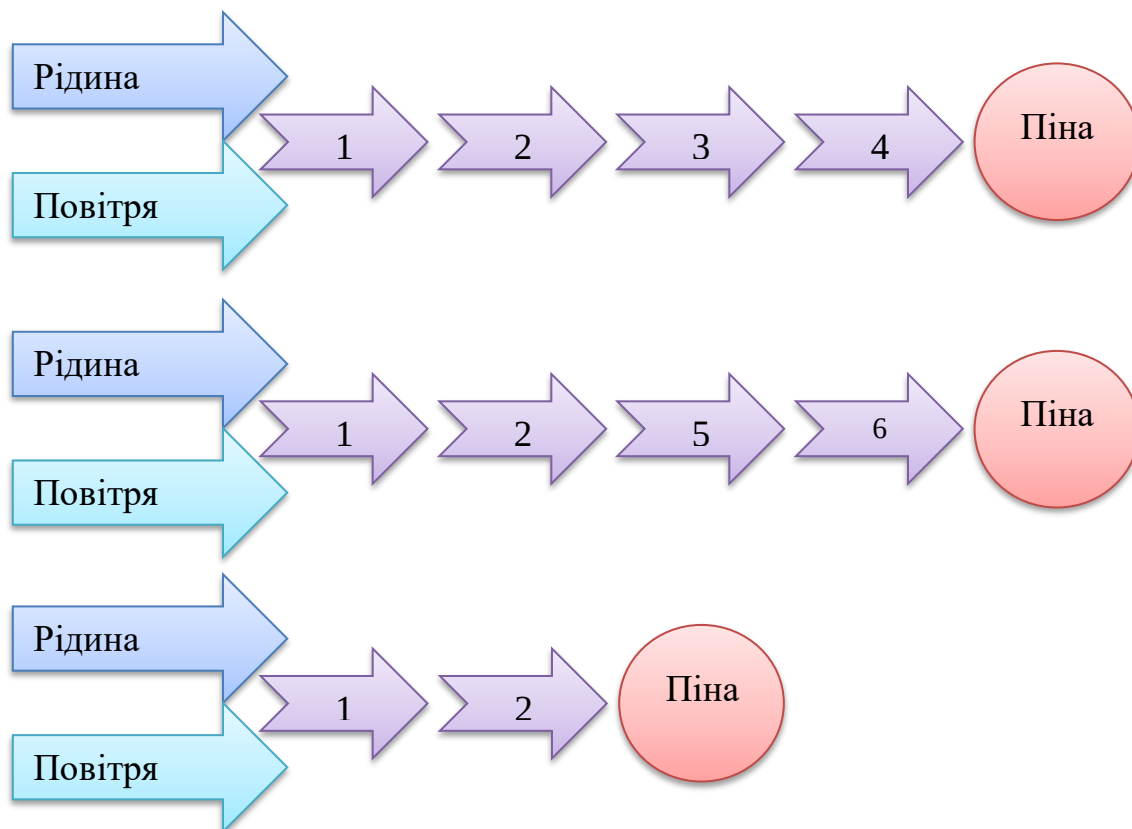


Рисунок 1.1 – Структурна схема піногенеруючих пристроїв:

1 – камера змішування; 2, 4 – сітка; 3 – легкий сипкий матеріал; 5 – отвори трубки; 6 – перфорована трубка.

Формування пінистого розчину в спеціалізованому пристрої для насичення рідини газом базується на принципі кавітаційного впливу. Під час проходження рідини через центральну вставку в корпусі пристрою за її потоком формується кавітаційна каверна. Цей феномен відіграє ключову роль у процесі: каверна створює зону розрідження, яка сприяє інтенсивному введенню газового потоку в рідину.

Утворений газовий потік активно взаємодіє з рідиною, забезпечуючи її перемішування і диспергування. Завдяки цьому компоненти суміші рівномірно

розподіляються в об'ємі, утворюючи стабільну газорідинну емульсію. Такий підхід забезпечує високу ефективність насичення рідини газом навіть за відносно низьких витрат енергії.

Структурна схема пристрою (див. на рис. 1.2) демонструє, як основні елементи конструкції сприяють оптимізації процесу. Центральна вставка виконує не лише функцію створення каверни, але й спрямовує потік рідини, забезпечуючи необхідну швидкість і турбулентність для ефективного змішування.

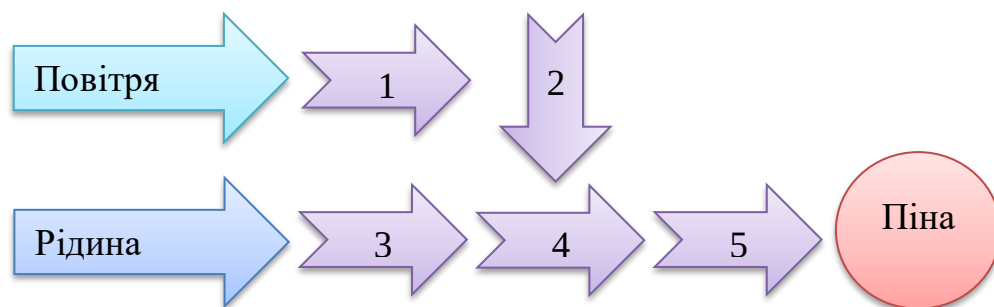


Рисунок 1.2 – Структурна схема пристрою для насичення рідини газом:
1 – корпус; 2 – центральна вставка.

Застосування таких пристроїв має широкий спектр у промисловості. Вони використовуються для підготовки промивальних рідин у бурінні, а також для створення робочих сумішей у хімічних та харчових технологіях. Подальше вдосконалення конструкції, наприклад, шляхом впровадження новітніх матеріалів або регульованих параметрів потоку, дозволить розширити сфери використання та підвищити ефективність процесу насичення рідини газом.

Одним із важливих елементів ефективного функціонування піногенеруючого пристрою є забезпечення належного рівня тиску повітря, що подається в систему. Повітря має надходити під тиском, що дорівнює або перевищує тиск рідини, щоб забезпечити стабільність і якість утворення піни.

Це потребує додаткового оснащення пристрою компресором високого тиску, який здатен створювати необхідні параметри подачі газу.

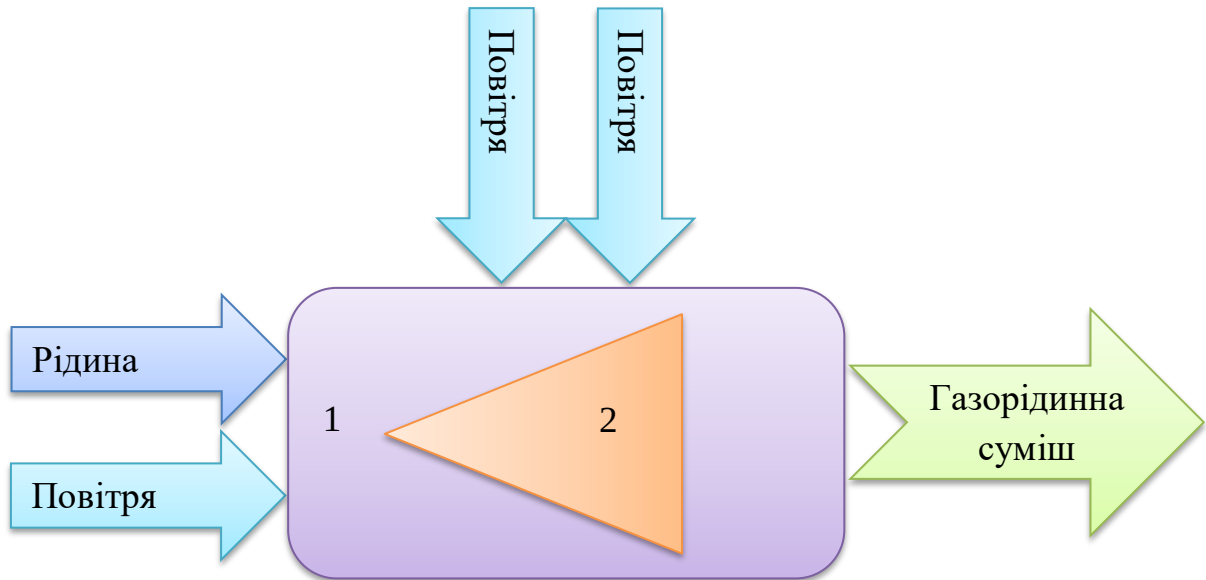


Рисунок 1.3– Структурна схема піногенеруючого пристрою:

1 – циліндрична вставка; 2 – отвори дифузора; 3 – ежекторна вставка;
4 – камера змішування; 5 – сітки.

Для досягнення високої якості піни, особливо під час виконання геологорозвідувальних робіт, використовуються вдосконалені піногенеруючі пристрої. Конструктивною особливістю таких пристроїв є наявність сітчастих елементів із розміщеними в них рухомими кульками, які розташовані на виході з камери піноутворення. Газорідинна суміш, проходячи через ці сітки, взаємодіє із кульками, що сприяє значному покращенню процесу утворення піни [93].

У процесі роботи газорідинна суміш спрямовується на сферичну сітку з кульками, викликаючи їх активний рух у замкнутій зоні. Під дією потоку кульки здійснюють багаторазові зіткнення між собою, зі стінками ежекторної вставки та сітки, що створює додатковий механічний вплив на суміш. У результаті цих зіткнень від кульок відділяються мікрочастинки, які

потрапляють у газорідинну суміш. Це сприяє формуванню дрібних і рівномірних бульбашок, що підвищує стабільність і якість утвореної піни.

Такий конструктивний підхід забезпечує:

1. Подрібнення компонентів газорідинної суміші вже на початковій стадії її потрапляння в пристрій.
2. Багаторазове диспергування суміші завдяки руху кульок по замкнутій траєкторії та їх взаємодії з потоком.
3. Кавітаційні ефекти і магнітні явища, що утворюються під час роботи пристрою, додатково сприяють покращенню структури піни.
4. Збагачення пінної суміші мікрочастинками, які утворюються внаслідок зношення кульок, забезпечуючи утворення дрібнодисперсних, рівномірних за розміром бульбашок [72]..

Результатом такого технологічного рішення є підвищення ефективності очищення вибою та стовбура свердловини від шламу, а також покращення стабільності промивального процесу. Завдяки цьому забезпечується більш продуктивне буріння, зменшення енергетичних витрат і зниження ризиків аварійних ситуацій у процесі геологорозвідувальних робіт [92].

Подальше вдосконалення таких піногенеруючих пристроїв може включати оптимізацію конструкції, використання нових матеріалів для кульок і сітчастих елементів, а також розробку адаптивних систем регулювання тиску газу й рідини для забезпечення максимальної ефективності утворення піни в різних умовах буріння.

Піногенеруючі пристрої широко використовуються для буріння свердловин різного призначення, включаючи геологорозвідувальні, інженерно-геологічні та геофізичні. Вони демонструють високу ефективність за умов невеликого тиску робочого середовища. Однак при значному збільшенні тиску виникає інтенсивне зношування поверхонь корпусу, вставок і сіток, що значно зменшує термін їх експлуатації.

Одним із перспективних рішень є піногенеруючий пристрій із камерою диспергування, виконаною у формі зрізаного конуса, що розширюється у напрямку руху піни. Усередині такої камери розташовано глухий циліндр, а стінки камери з'єднані гвинтовою перегородкою. Як наповнювач використовується пружний волокнистий матеріал, який сприяє ефективному диспергуванню суміші. Повітря та рідина вводяться через форсунку, розташовану на вході в камеру диспергування. На виході з камери встановлено ґратчастий елемент і пінопровід, які забезпечують стабільне утворення піни [9].

Структурну схему пристрою наведено на рисунку 1.4.

Для роботи за високих тисків (3–5 МПа) розроблено піногенеруючі пристрої, що дозволяють отримувати піни із заданими параметрами (кратністю, стійкістю, тиском). Вони працюють із розчинами поверхнево-активних речовин (ПАР) і природним газом, подаючи робочу рідину за допомогою насосів, що забезпечують тиск до 40–50 МПа. Однак у польових умовах бурових установок використання такого обладнання ускладнюється необхідністю додаткових насосних агрегатів і компресорів високого тиску.

Проведений аналіз конструкцій піногенеруючих пристроїв дозволяє виділити основні принципи їх класифікації:

1. За способом подачі повітря:
 - подача за рахунок атмосферного тиску;
 - використання компресора, для подачі повітря під тиском.
2. За місцем і способом утворення піни:
 - камера змішування;
 - сіткові пакети;
 - перфоровані трубки;
 - комбіновані конструкції (камера змішування і сітки);
 - вихрові камери.

Особливу увагу привертають пристрої, де рідина та газ подаються тангенційно у вихрову камеру. Завдяки відцентровим силам рідина відділяється

й виходить через спеціальний відвідний канал, а піна, проходячи через калібруючі ґратки, подається у вихідний пінопровід. Структурна схема такого пристрою представлена на рисунку 1.4.

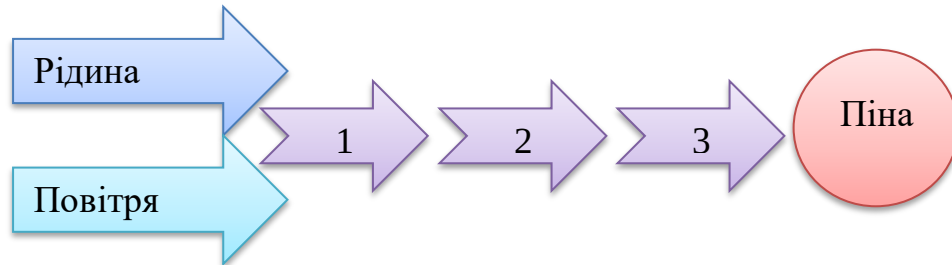


Рисунок 1.4 – Структурна схема піногенератора для технічної піни:

1 – форсунка; 2 – камера диспергування; 3 – ґратка.

Запропонована конструкція пристрою, зображена на рисунку 1.6, передбачає подачу промивальної рідини через соплову вставку. Це забезпечує більш ефективне змішування фаз і стабільність отриманої піни, що сприяє поліпшенню очищення вибою свердловини.

Подальше вдосконалення таких пристроїв включає:

- Використання сучасних зносостійких матеріалів.
- Оптимізацію геометрії камер і вставок.
- Інтеграцію адаптивних систем регулювання подачі рідини та повітря залежно від умов буріння.

Такі конструктивні заходи дозволять знизити енергоспоживання, підвищити якість піни та забезпечити високу ефективність бурових робіт навіть за складних умов експлуатації.

Через високі швидкості витікання рідини із сопла в камері змішування виникає розрідження, що сприяє надходженню атмосферного повітря в цю камеру та йде процес формування пінистого розчину, в результаті перемішування струменів рідини з повітрям.

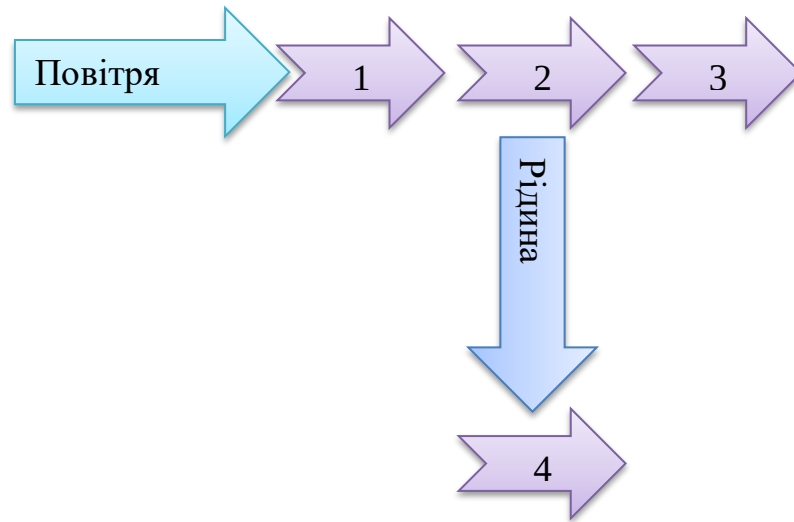


Рисунок 1.5 – Структурна схема піногенератора для буріння свердловин:
1 – ежектор; 2 – вихрова камера; 3 – калібруючі ґратки; 4 – відвідний канал.

При значних обсягах подачі рідини використання односоплового пристрою стає малоефективним через обмежену площу контакту між рідиною та повітрям. Окрім того, наявність лише однієї ступені насичення рідини повітрям або газом призводить до низької якості цього процесу. Як наслідок, у такому пристрої в'язка промивна рідина не забезпечує достатнього рівня перемішування та диспергування суміші, необхідного для утворення піни.

Для поліпшення процесу утворення піни пропонується модернізувати піногенератор, збільшивши кількість ступенів насичення рідини повітрям або газом, а також розширити площу взаємодії з потоками рідини через ефективніше змішування і диспергування суміші.

Камеру змішування розділено на кілька ежекційних секцій попереднього змішування, що включають сопло та канал для подачі повітря або газу. Додатково передбачено камеру кінцевого змішування для потоків, які виходять із попередніх камер. Стабілізація піноутвореного потоку відбувається в дифузорі, де знижується швидкість руху рідини і одночасно підвищується тиск.

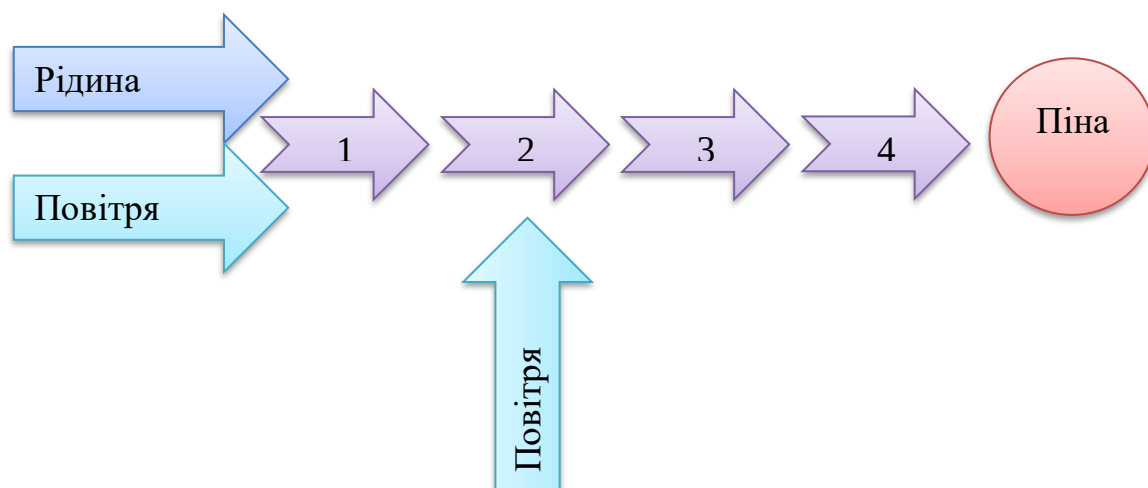


Рисунок 1.6 – Структурна схема піногенератора, який удосконалюється:
1 – багатосоплова вставка; 2 – камера попереднього змішування; 3 – камера кінцевого змішування; 4 – дифузор.

Піногенеруючий пристрій (рисунок 1.7) для насичення промивальної рідини повітрям або газом з подальшим формуванням пінистого розчину, працює так. Промивальна рідина надходить в корпус 1 піногенератора і далі надходить в багатосоплову вставку 2 потрапляє до камери 3 попереднього перемішування, це відбувається завдяки ефекту ежекції, захоплюється повітря, яке подається каналами 4 та перемішується з рідиною.

Після цього суміш надходить до камери остаточного змішування 5, де йде процес інтенсивного перемішування та диспергування розчину із багатьох потоків. У дифузорі 6 відбувається процес стабілізації сформованого потоку піни.

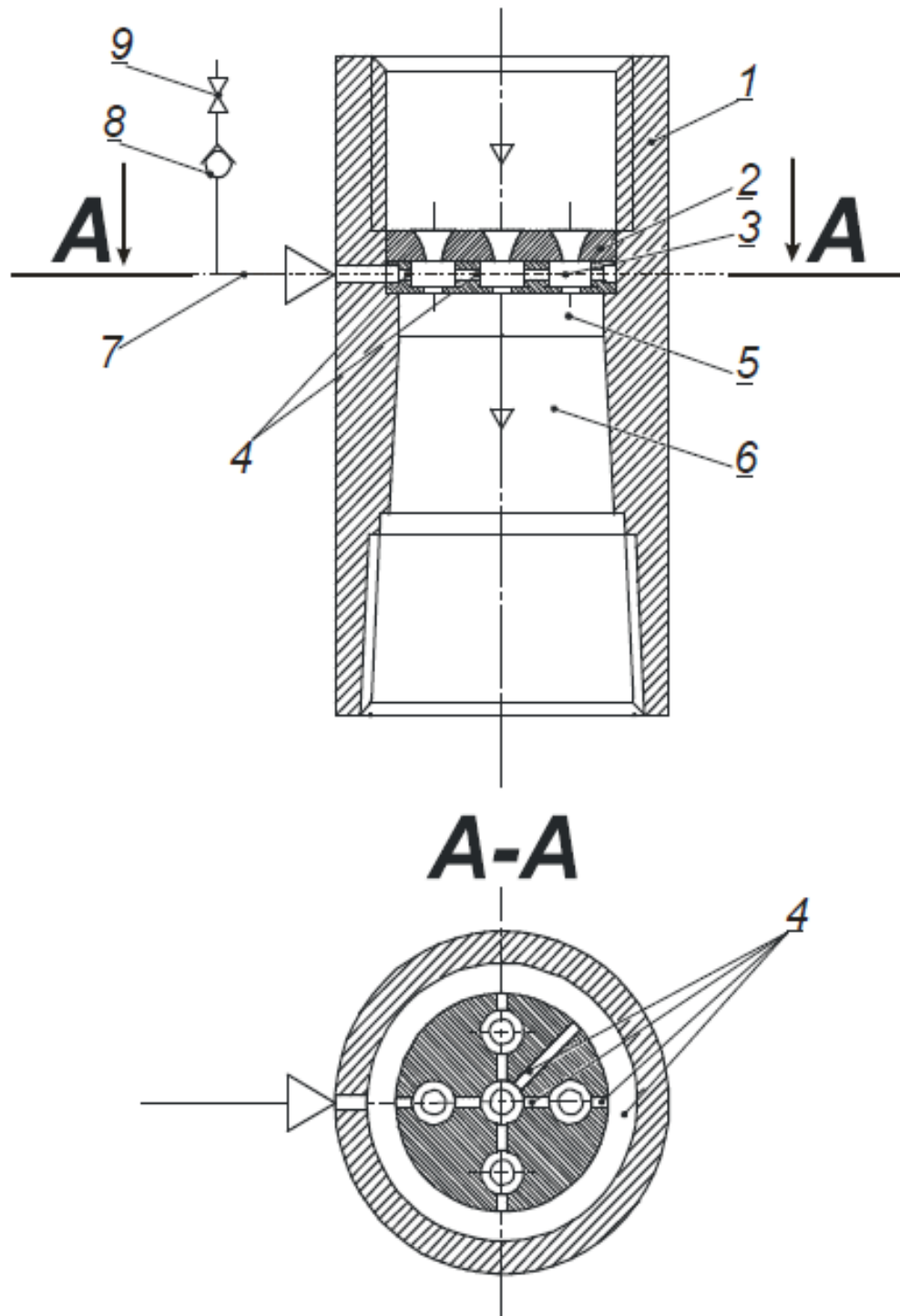


Рисунок 1.7 – Піногенеруючий пристрій:

1 – корпус; 2 – сопла; 3 – камери ежекційні попереднього змішування;
 4 – камери для повітря чи газу; 5 – камера кінцевого змішування;
 6 – дифузор; 7 – штуцер; 8 – зворотній клапан; 9 – запірнорегулюючий елемент.

В канали 4 повітря (газ) надходить через штуцер 7, зворотний клапан 8, запірнорегулюючий елемент 9. У випадку, де швидкість проходження суміші в багатосопловій вставці 2 є незначною для формування ефекту ежекції (тобто залучення повітряної маси) суміш при відсутності зворотного клапана 8 надходила би в повітряний або газовий канал. Запірнорегулюючий елемент 9 виконує функцію регулювання обсягу повітря чи газу, що надходить до системи, забезпечуючи можливість коригування характеристик пінистого розчину, зокрема його густини.

Провівши структурний аналіз існуючих схем піногенераторів, нами пропонується нова структурна схема, яка покращить раціональні режими роботи піногенератора, збільшуючи ефективність перемішування і диспергування суміші (рідини і повітря), що в свою чергу утворить піну, з контрольованими параметрами роботи піно генератора по тиску повітря на вході і подачі рідини.

1.3 Використання піногенераторів у циркуляційних системах бурових установок

Очищення і регенерація бурового розчину – це важливий компонент циркуляційних систем бурових установок, який безпосередньо впливає на якість буріння, його швидкість та економічні показники. З появою сучасних технологій значну увагу почали приділяти використанню піногенераторів, які дозволяють створювати пінний буровий розчин з раціональними фізико-хімічними властивостями. Включення піногенератора до складу циркуляційної системи відкриває нові можливості для підвищення ефективності очищення бурового розчину, покращення екологічної безпеки та зниження витрат на реагенти.

Піногенератор є спеціалізованим пристроєм, що використовується для створення стабільної піни шляхом змішування бурового розчину, поверхнево-активних речовин (ПАР) і повітря. У циркуляційній системі бурової установки

піна виконує декілька важливих функцій: транспортує вибурену породу з вибою свердловини до поверхні, очищає розчин від механічних домішок, знижує в'язкість розчину та покращує його фізико-хімічні властивості. Завдяки цьому забезпечується стабільна робота циркуляційної системи, зменшується ризик утворення застійних зон, а також підвищується продуктивність буріння.

Сучасні піногенератори виготовляються з використанням інноваційних матеріалів і технологій, що забезпечує їх високу надійність та енергоефективність. Завдяки блочному виконанню вони легко інтегруються у циркуляційні системи різних типів бурових установок, що дозволяє зменшити витрати на монтаж і демонтаж обладнання, а також знизити транспортні витрати. Багатофункціональність піногенераторів дозволяє ефективно адаптувати їх до змінних умов буріння, таких як глибина свердловини, тип гірничої породи або кліматичні особливості регіону.

Циркуляційна система з піногенератором забезпечує багатократну замкнену циркуляцію бурового розчину, що значно зменшує витрати на хімічні компоненти і знижує вплив на навколишнє середовище. Використання пінного розчину мінімізує утворення токсичних відходів і стічних вод, адже шлам, що утворюється в процесі очищення, є густим і легко підлягає транспортуванню та утилізації. Особливо актуальним є застосування піногенераторів у природоохоронних зонах, де екологічна безпека буріння має першочергове значення.

Одним із важливих аспектів використання піногенераторів є їх здатність регулювати властивості бурового розчину в реальному часі. Завдяки автоматизованим системам керування піногенератор може оперативно змінювати склад і властивості піни залежно від поточних умов буріння. Це забезпечує підвищену стійкість стовбура свердловини, знижує ризик обвалів стінок і дозволяє підтримувати стабільний тиск у свердловині.

Економічні переваги піногенераторів полягають у зниженні витрат на реагенти, водопостачання та утилізацію відходів. Зокрема, пінний розчин

дозволяє значно зменшити об'єм стічних вод і скоротити витрати на транспортування шламу. У технологічному аспекті використання піногенераторів дозволяє покращити якість очищення бурового розчину, що сприяє зменшенню кількості аварійних ситуацій і підвищенню загальної ефективності буріння.

Окремо слід зазначити соціальний ефект від впровадження піногенераторів у циркуляційні системи бурових установок. Автоматизація процесів приготування та очищення бурових розчинів дозволяє мінімізувати ручну працю, знижує фізичне навантаження на працівників і покращує умови праці буровиків. Це сприяє підвищенню безпеки та продуктивності роботи персоналу, що є важливим фактором для сучасної бурової галузі.

Високий потенціал піногенераторів підтверджується численними дослідженнями та практичними прикладами їх використання у бурінні.

Подальший розвиток технологій, спрямованих на вдосконалення конструкції піногенераторів і розробку нових екологічно безпечних компонентів для пінного розчину, забезпечить ще більшу ефективність та стійкість бурових процесів у майбутньому.

1.4 Аналіз досліджень, спрямованих на підвищення ефективності роботи піногенеруючих пристроїв для очищення промивальної рідини

Дослідження, спрямовані на вдосконалення піногенеруючих пристроїв, що забезпечують ефективну очистку промивальної рідини під час буріння, активно проводяться як в Україні, так і за її межами. Серед найбільш значущих наукових напрацювань у цьому напрямі слід виокремити роботи українських дослідників І.Н. Резніченка, Ю.М. Путівціва, С.А. Рябоконя, а також закордонних дослідників, таких як М. Бінгам, В. Кагл, Л. Вільдер та Л. Хоберок [4, 50, 51].

Аналіз конструкцій піногенеруючих пристроїв виявив, що їх ефективність безпосередньо залежить від характеристик формування піни, зокрема кратності, стійкості та рівномірності розподілу бульбашок. Однією з основних проблем є досягнення високих показників дисперсності піни за умов значного тиску промивальної рідини, що ускладнюється конструктивними особливостями пристроїв.

Значна увага приділяється впливу форми і розташування внутрішніх елементів піногенератора, таких як сітки, вставки та диспергуючі камери. Проведені дослідження демонструють, що збільшення ефективності роботи пристроїв досягається за рахунок:

- застосування багатоступеневої схеми диспергування;
- використання сферичних елементів (кульок), що створюють додаткові ударні й турбулентні впливи на газорідинну суміш;
- збільшення амплітуди віброприскорення та оптимізації траєкторій руху газорідинної суміші всередині камери.

Експериментальні дослідження підтверджують, що для забезпечення стабільного формування піни ключовим є правильний підбір тисків подачі газу і рідини, а також застосування конструкцій із високою зносостійкістю матеріалів.

Наукові праці також звертають увагу на важливість тангенційного підведення газорідинної суміші до вихрової камери, що дозволяє покращити якість піни за рахунок відцентрових сил і її подальшого фільтрування через калібруючі сітки. Структурні схеми таких пристроїв зображені на рисунку 1.4.

Проведений аналіз свідчить про доцільність подальших досліджень і модернізації конструкцій піногенеруючих пристроїв. Використання сучасних матеріалів, вдосконалення геометрії внутрішніх елементів та впровадження адаптивних систем управління дозволять значно підвищити ефективність очищення промивальної рідини й забезпечити стабільну роботу бурових установок.

1.5 Висновки до розділу 1. Мета та задачі дослідження

1. Промивання свердловин пінистими розчинами є актуальним завданням у бурових процесах, оскільки це дозволяє ефективніше видаляти шлами, знижуючи витрати води та енергії. Проблема полягає в оптимізації використання піногенеруючих пристроїв, які впливають на якість і стабільність піни, а також у вдосконаленні циркуляційних систем бурових установок для покращення ефективності промивання.

2. Для свердловин з аномально низькими пластовими тисками необхідна піна, як суміш для промивання свердловини на поклади нафти, газу, газоконденсату. Необхідне технічне рішення, що забезпечить якісний процес аерації та піноутворення та дасть можливість збільшувати продуктивність пристрою та ефективність роботи обладнання, враховуючи раціональні режими роботи та енергоефективність при цьому.

3. Для розрахунку динаміки цього процесу використовуються рівняння нерозривності струменя, збереження енергії, маси та імпульсу для двофазних потоків. Модель передбачає, що потік повітря не містить вологи, а рідина — повітряних бульбашок. Розрахунки зводяться до визначення впливу геометрії камери змішування, швидкості і температури потоків на процес змішування і створення пінного потоку. У разі змішування повітря і рідини застосовуються різні експериментальні та аналітичні залежності для визначення параметрів змішування, зокрема, таких як довжина камери змішування, ефективність пристрою та інші важливі характеристики.

Дивлячись на проведений вище аналіз конструкцій піногенеруючих пристроїв, а також на важливість ефективного створення піни під час освоєння свердловин вважаємо за доцільне проведення науково-конструкторської та дослідницької роботи з подальшого удосконалення конструкції камери змішування. Для досягнення поставленої мети було складено структурну схему дисертаційної роботи (рис.1.8)



Рисунок 1.8 Структурна схема дисертаційної роботи

Для досягнення мети дисертації розв'язувалися такі завдання:

1. сформувати аналітичні, математичні дослідження процесу насичення промивальної рідини повітрям, задля отримання пінистих розчинів, які використовуються під час розробки продуктивних нафтогазоносних пластів з аномально низькими пластовими тисками;
2. розробити удосконалену схему процесу змішування потоків енергій рідини, повітря і піни; запропонувати модернізовану, удосконалену конструкцію піногенератора; провести математичні дослідження раціональних, ефективних геометричних параметрів ежекційного піногенератора циркуляційної системи бурової установки;
3. зробити аналіз отриманих математичних розрахунків ефективних конструктивних параметрів і режимних характеристик удосконаленого піногенератора; розробити підхід, параметр, що до цього не використовувався, задля пошуку найбільш раціонального, енергетичного підходу, до встановлення взаємозв'язку між якістю піноутворення та оцінювання ефективності роботи піногенератора, визначивши найбільш раціональний, ефективний режим роботи піногенератора;
4. обґрунтувати новий принцип роботи піногенератора шляхом комп'ютерного моделювання, програмного продукту Solidworks, модуль – Flow Simulation; провести аналіз комп'ютерного моделювання з визначенням найбільш ефективних параметрів, характеризуючих ефективність і раціональність удосконаленого піногенератора: геометричні розміри піногенератора, а саме камери змішування, тиск повітря на вході і на виході з піногенератора, подача рідини на вході і розподіл швидкостей в повздовжньому перерізі пристрою, де відбувається стрибок ущільнення, отримуючи при цьому піну.

РОЗДІЛ 2

АНАЛІТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ НАСИЧЕННЯ ПРОМИВАЛЬНОЇ РІДИНИ ПОВІТРЯМ

Метою аналітичних досліджень, є проведення аналітичних, математичних досліджень, для реалізації удосконаленого, модернізованого багатосоплового ежекційного піногенератора, що буде забезпечувати раціональні, ефективні режими роботи циркуляційної системи бурової установки . Поставлене завдання реалізується завдяки впровадженню нової конструкції — модернізації камери перемішування, яка сприяє підвищенню ефективності процесу формування пінистої суміші та аерації, а також забезпечує скорочення тривалості освоєння свердловин [104].

Розглянуто аналог відомого піногенеруючого пристрою (рисунок 2.1), що застосовувався в процесах буріння свердловин з низькими пластовими тисками та видобуванні важких вуглеводнів. Ця конструкція включає циліндричний корпус, багатосоплову вставку, розташовану співвісно з камерою початкового перемішування, а також камери проміжного і турбулентного змішування, дифузор і канали для подачі повітря або газу. Основним недоліком цієї конструкції є фіксовані геометричні параметри діаметрів сопел і довжин змішувальних камер, що обмежує можливість одержання пінних сумішей із різноманітними характеристиками, необхідними для ефективного освоєння нафтових і газових свердловин.

Конструкція аналога складається з наступних елементів (рис. 2.1): корпус 1, багатосоплової вставки під різні діаметри сопел 2, дифузора з камерою турбулентного змішування 3, ежекторної вставки 4, канал для підводу повітря 5, змінні сопла 6, заглушки 7, розпірні кільця для зміни довжини камери ежекційного попереднього змішування 8, притискні кільця для зміни довжини кавітаційної камери проміжного змішування 9, завихрювач пінної суміші 10.

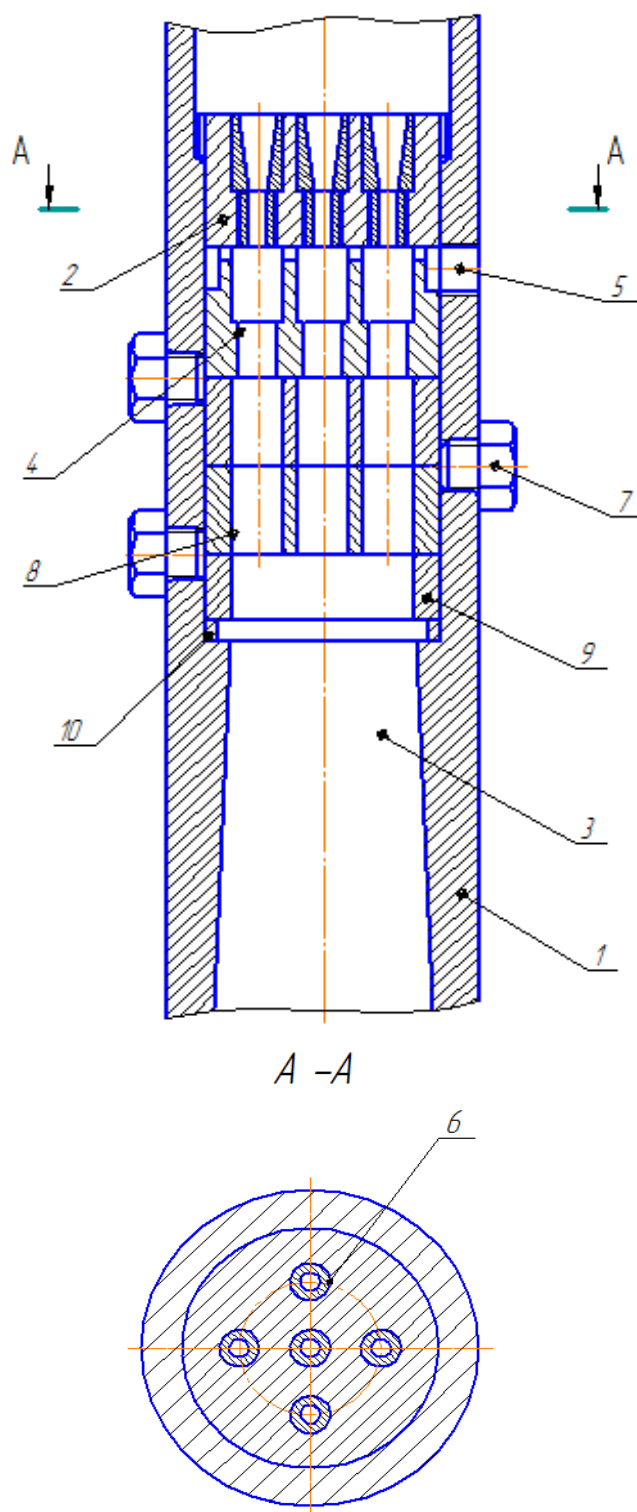


Рисунок 2.1 – Піногенератор багатосопловий ППП–100x25–5:

1 – корпус; 2 – багатосоплова вставка; 3 – дифузор з камерою турбулентного змішування; 4 – ежекторна вставка; 5 – канал для підводу повітря; 6 – змінні сопла; 7 – заглушки; 8 – розпірні кільця; 9 – притискні кільця; 10 – завихрювач пінної суміші.

Основною недосконалістю цього пристрою є недостатня ефективність насичення рідини повітрям, що зумовлено малою площею контакту між ними в ежекторній вставці. Як наслідок, не забезпечується належне змішування струменів рідини та повітря на початку процесу їх змішування.

Головна задача аналітичних досліджень полягає у вдосконаленні конструкції піногенератора, що сприятиме підвищенню ефективності процесу піноутворення завдяки використанню змішувача для рідини та повітря. Завдання вдосконалення піногенератора розв'язується шляхом розширення сукупості характеристик піностого розчину на виході без зміни тиску та витрати рідини й повітря на вході до піногенератора. Конструкція змішувача рідини й повітря передбачає їх одночасну подачу до камери попереднього змішування, де формуються зони інтенсивної турбулентності у робочій області з'єднання рідини та повітря. Це інженерне напрацювання забезпечує потенціально збільшувати продукційний потенціал пристрою та його дієвість використання [104].

На рисунку 2.2 зображена представлено запропоновану конструкцію піногенератора, що складається з циліндричного корпусу 1, у якому розташовано змішувач рідини й повітря 2 з ущільнювальними кільцями 3, камеру попереднього змішування 4, канал 5 для підведення повітря, розпірні кільця 6, притискні кільця 7, завихрювач пінної суміші 8 та дифузор 9 із камерою турбулентного змішування. У змішувачі рідини й повітря передбачені вертикальні отвори 10 які слугують підведення рідини та горизонтальні 11 і вертикальні 12 отвори для підведення повітря [104].

Робота піногенератора з насичення рідини повітрям і подальшим формуванням піни відбувається таким шляхом. Рідина надходить у корпус 1 пристрою, звідки через отвори 10 змішувача рідини й повітря 2 потрапляє до камер попереднього змішування 4. Одночасно до змішувача подається стиснене повітря через канал 5 у корпусі 1 та отвори 11 і 12 змішувача рідини й повітря 2. Далі виходить із змішувача повітря та потрапляє до камер

попереднього змішування 4, де у робочій зоні формуються зони інтенсивної турбулентності.

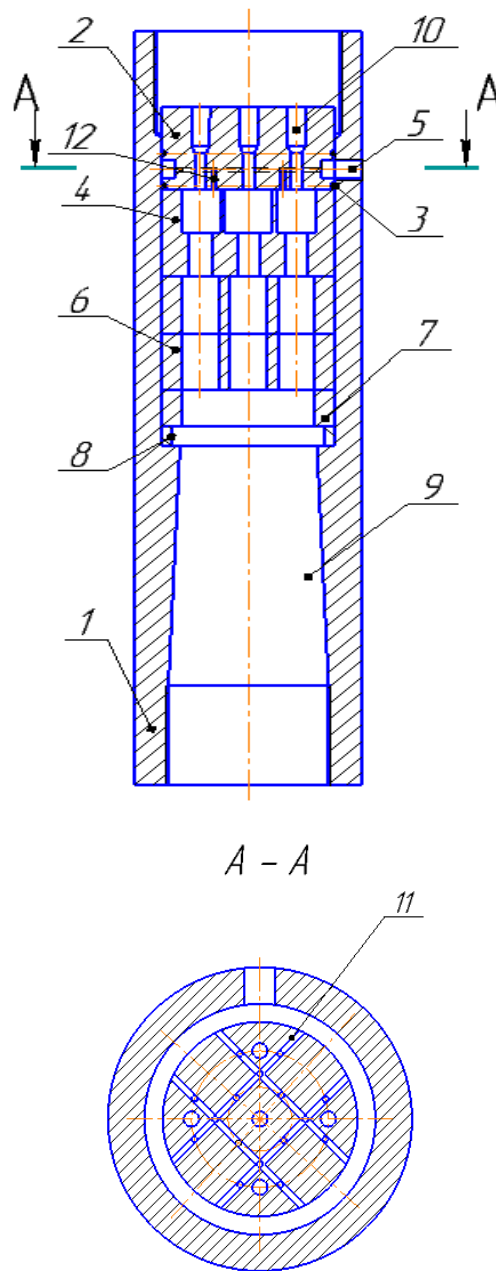


Рисунок 2.2 – Модернізований піногенератор багатосопловий ПГП–100х25–5:

1 – корпус; 2 – змішувач рідини і повітря; 3 – ущільнювальні кільця; 4 – втулка; 5 – канал для підведення повітря; 6 – розпірні кільця; 7 – притискні кільця; 8 – завихрювач пінної суміші; 9 – загальний дифузор; 10 – вертикальні отвори для подачі рідини; 11 – горизонтальні отвори для подачі повітря; 12 – вертикальні отвори для подачі повітря.

У камерах змішування, сформованих розпірними кільцями 6 та притискними кільцями 7, відбувається інтенсивна турбулізація потоків, що сприяє ефективному змішуванню повітря з розчином і формуванню піни. Після цього розчин проходить завихрювач пінної суміші 8, це забезпечує додаткове покращення процесу змішування та формування піностої структури в камері змішування, розташованій у дифузорі 9. У дифузорі розчин переміщується турбулентним способом, що сприяє закріпленню ефекту насичення рідини повітрям і стабільному піноутворенню [104].

Таким чином, використання запропонованої конструкції багатосоплового піногенератора з модернізованою камерою змішування забезпечує високоякісний процес аерації та утворення пінної суміші. Це інженерне напрацювання забезпечує потенціально збільшувати продукційність режимів роботи пристроїв та ефективність роботи обладнання циркуляційної системи бурової установки [104].

2.1 Визначення ефективності роботи піногенераторів у циркуляційній системі бурового комплексу

Однією з основних задач оптимізації є покращення ефективності процесу очищення пінного бурового розчину. Піногенератори забезпечують утворення стабільної піни шляхом змішування бурового розчину, повітря та поверхнево-активних речовин (ПАР). Така піна має високі адгезивні властивості, що дозволяє ефективно виносити частинки вибуреної породи з вибою свердловини та транспортувати їх до поверхні. Однак, динаміка процесів утворення піни та її взаємодії з вибуреною породою залежить від низки факторів, таких як параметри потоку, частота коливань, геометрія робочої камери піногенератора та склад бурового розчину. Саме тому необхідно проводити дослідження, спрямовані на визначення раціональних, ефективних режимів роботи, які б враховували всі ці змінні [13, 14].

У контексті сучасного буріння важливим аспектом є зменшення зносу елементів піногенератора, проектування обладнання і раціональних режимів роботи, які будуть забезпечувати енергоефективні процеси буріння. Встановлено, що знос найбільш інтенсивно відбувається в зонах контакту піни з елементами конструкції, а також у місцях максимального навантаження. Аналіз цих зон за допомогою комп'ютерного моделювання та симуляції дозволяє розробити рекомендації щодо вибору матеріалів для виготовлення елементів піногенератора, а також конструктивних змін, які можуть знизити інтенсивність зношування.

Одним із перспективних напрямків є впровадження математичного моделювання для визначення динамічних характеристик роботи піногенератора. Метод скінченних елементів (МСЕ) широко використовується для аналізу вібраційних систем, і його застосування для моделювання роботи піногенераторів дозволяє оцінити динаміку розподілу енергії у системі. Дослідження показують, що оптимізація частоти коливань піногенератора може значно підвищити ефективність процесу очищення та транспортування бурового розчину. Також математичне моделювання дозволяє врахувати вплив таких факторів, як в'язкість розчину, тиск у системі та характеристики об'ємного потоку повітря [18].

Експериментальні дослідження показують, що однією з проблем під час роботи піногенераторів є нерівномірний розподіл піни у системі. Це може призводити до зниження ефективності очищення та підвищення навантаження на окремі елементи конструкції. Застосування додаткових горизонтальних та комбінованих рухів у конструкції піногенератора дозволяє покращити рівномірність розподілу піни, що сприяє збільшенню продуктивності обладнання та зменшенню витрат енергії [11].

Важливу роль відіграє вибір раціонального складу пінного розчину. Дослідження показують, що використання екологічно безпечних ПАР з високими змочувальними властивостями дозволяє не тільки знизити

негативний вплив на навколишнє середовище, але й підвищити стабільність піни. Інтеграція автоматизованих систем керування параметрами пінного розчину, таких як його в'язкість, концентрація ПАР і тиск у системі, дозволяє оперативно реагувати на зміни умов буріння.

Застосування передових методів моделювання та експериментальних досліджень дозволяє визначити раціональні параметри роботи піногенератора для різних умов експлуатації. Зокрема, використання комп'ютерного моделювання дозволяє оцінити вплив конструктивних змін на продуктивність обладнання без необхідності проведення дорогих польових випробувань. Це відкриває можливість для швидкого впровадження інновацій у виробничий процес [2].

Результати проведених досліджень піногенераторів дають підстави стверджувати, що їх удосконалення не тільки підвищить ефективність освоєння свердловин з важкими вуглеводнями, а й розвитку більш енергоефективних і екологічно сприятливих технологій. Розробка систематизованих рекомендацій щодо оптимізації параметрів роботи піногенераторів є важливим кроком для забезпечення стійкості та надійності бурових установок у сучасних умовах.

2.2 Аналітичне визначення динаміки утворення пінистої суміші, враховуючи зміни геометрії та раціональних режимів піногенератора

Розглядається модель із центральним підведенням рідини, що витікає через насадку (рис. 2.3). Потік повітря надходить під тиском через бічні канали прямокутного перерізу та приєднується до потоку робочої рідини безпосередньо в камері змішування [111].

Робочий струмінь, що подається з насадки, завдяки приєднанню повітря по етапно розходить та на деякій відстані від входу в камери змішування (перетин бб) контактує зі стінками камери. Згідно з результатами досліджень, межі струменя описуються прямими лініями, причому кут їх нахилу відносно вісі відрізняється в межах камери змішування z_1 і z_2 .

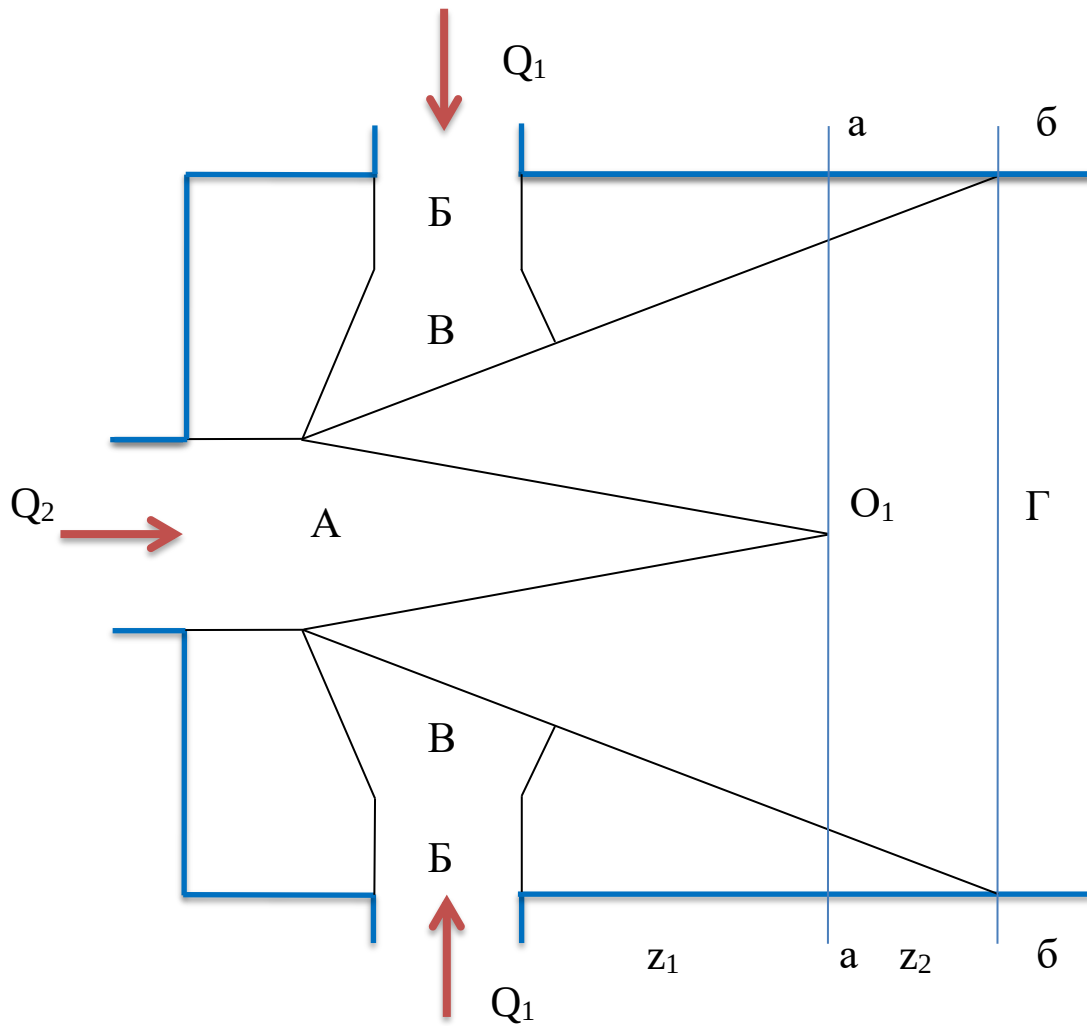


Рисунок 2.3 – Аналітична схема процесів з'єднування потоків [111]

На початковому відрізку камери, у центральній зоні потоку утворюється ядро А, спектр якого поступово звужується вздовж струменя й у точці O_1 тотожно нульовим значенням. Струмінь повітря, який подається в камеру (ділянка Б), має конфузорну форму кільцевого перерізу. Між ділянками А і Б формується ділянка В, де здійснюється з'єднання і перемішування двох струменів, тоді як у зоні Г процес змішування робочої рідини та повітря завершується. Залежно від геометричних параметрів сопел для подачі рідини та каналів для подачі повітря, точка O_1 може розташовуватися (рис. 2.3) з правої сторони від перетину бб. Тоді довжина області в перетинах аа та бб дорівнює $Z_2=0$ [111].

В піногенераторі, де центральне підведення рідини у напрямку вісі утворюється двофазний газоподібний струмінь, тоді як у бічних зонах спостерігається краплинний режим течії. Для камери змішування на початковій та основній ділянках приймається спрощена одновимірна модель двох супутніх потоків: повітряний потік із однорідними швидкістю, температурою та густиною нашаровується на рідинний потік, який також характеризується однорідністю у поперечному перерізі. Відповідно, швидкість, температура та густина повітря і рідини змінюються лише вздовж повздовжньої координати [111].

Розрахунки виконуються з урахуванням таких граничних припущень:

1. повітряний потік не містить вологи;
2. у потоці рідини відсутні повітряні бульбашки;
3. втрати внаслідок тертя у прикордонному шарі на стінках камери вважаються незначними;
4. довжина початкової та основної ділянок визначається і задається за допомогою експериментального співвідношення;
5. маса конденсованого повітря приєднується до рідинного потоку зі швидкістю повітряного струменя;
6. статичний тиск у поперечному перерізі камери змішування залишається сталим.

Для відносної довжини вхідної області найбільш точне узгодження з експериментальними даними забезпечує рівняння Лишевського:

$$L/d = 50,3 We^{-0,83} \left(\rho_1 / \rho_2 \right)^{0,5} Lp^{-0,096}; \quad (2.1)$$

де $We = \frac{\rho_1 d_1 (g_2 - g_1)^2}{\sigma_2}$ – число Вебера;

d_1 d_2 – відповідно діаметри повітряного та рідинного струменів;

σ_2 – поверхневий натяг рідини при відповідному тиску;

μ_2 – в'язкість рідини при відповідному тиску;

ρ_1, ρ_2 – відповідно густина повітря та рідини при тисках p_1 і p_2 ;

$$Lp = \frac{\rho_2 d_2 \sigma_2}{\mu_2^2} - \text{критерій Лапласа.}$$

Довжина цієї ділянки може бути розрахована на основі експериментальної залежності::

$$L/D = 18,36 M_R^{-0,181}, \quad (2.2)$$

де $M_R = \frac{\rho_2 g_2}{\rho_1 g_1}$ – співвідношення, добуток тиска та швидкості рідини до

добутка тиска і швидкості повітря,

D – геометричний параметр — діаметр змішувальної камери.

Розглянемо систему базових рівнянь.

Рівняння безперервності потоку для повітря має вигляд:

$$\text{повітряний струмінь} \quad \frac{d}{dz} \rho_1 \varphi_0 g_1 S_c = -\chi \varphi_{\max} S_k; \quad (2.3)$$

$$\text{рідинний струмінь} \quad \rho_2 \frac{d}{dz} (1 - \varphi_0) g_2 S_c = \chi (1 - \varphi_{\max}) S_k \quad (2.4)$$

$\chi = \frac{dm_1}{dt \cdot dV}$ – під швидкістю конденсації розуміють масу повітря, яка

переходить у конденсовану фазу за одиницю часу в межах одиниці об'єму.

$\chi = 2\alpha''(T_n - T_2) \frac{\sqrt{1 - \varphi_{\max}}}{\lambda R(z)}$ – У даній формулі передбачається, що температура

повітряної фази дорівнює температурі насичення T_n при $p = \text{const}$.

α'' – коефіцієнт тепловіддачі при процесі конденсації;

$\varphi_{\max}$ – максимальна паромісткість потоку на виході з основної частини змішувальної камери;

φ_0 – значення паромісткості у вихідному перерізі сопла під час входу струменя до основної зони камери змішування;

S_k – площа зрізу змішувальної камери;

S_c – площі початкових сопел.

Рівняння зміни обсягу руху:

$$- \text{повітряний струмінь} \quad \rho_1 \varphi_0 \vartheta_1 \frac{d\vartheta_1}{dz} = -F - \varphi_{\max} \frac{dp}{dz} \quad (2.5)$$

$$- \text{рідинний струмінь} \quad \rho_2 (1 - \varphi_0) \vartheta_2 \frac{d\vartheta_2}{dz} + \chi (\vartheta_2 - \vartheta_1) = F - (1 - \varphi_{\max}) \frac{dp}{dz}. \quad (2.6)$$

де F – позначає силу тертя на межі поділу фаз, віднесена до одиниці об'єму двофазного середовища;

$$F = \frac{C_f \rho_1 (\vartheta_2 - \vartheta_1)^2 \sqrt{(1 - \varphi_{\max})}}{R(z)} \quad (2.7)$$

$R(z)$ – радіус змішувальної камери;

C_f – коефіцієнт опору на межі поділу фаз.

При взаємодії повітряного потоку з рідинним струменем у ділянці зрізу сопел утворюється граничний ламінарний шар [111].

Величина коефіцієнта опору для даної області обчислюється за залежністю Блазіуса:

$$C_f = 1,328 \frac{1}{\sqrt{\text{Re}_z}}. \quad (2.8)$$

$$\text{Re}_z = \frac{\rho_1 (\vartheta_2 - \vartheta_1) z}{\mu_1}, \quad (2.9)$$

де μ_1 – коефіцієнт динамічної в'язкості повітряного середовища.

Коли значення числа Re більших $5 \cdot 10^5$ граничний ламінарний шар набуває турбулентного стану, де коефіцієнт опору

$$C_f = 0,0576 \frac{1}{\sqrt[5]{\text{Re}_z}} \quad (2.10)$$

Залежність енергетичного балансу для теплоізованої змішувальної камери без врахування впливу сил тертя на стінках:

$$\text{повітряний струмінь} \quad \rho_1 \varphi_0 \vartheta_1 \frac{di_{01}}{dz} - \chi T_{\text{н}} s''(p) = \vartheta_1 \varphi_{\max} \frac{dp}{dz} - F \vartheta_2 - q_1 \quad (2.11)$$

рідинний струмінь

$$\rho_2(1-\varphi_0)g_2 \frac{di_{02}}{dz} + \chi[i_{02} - i_{01} - T_n s'(p)] = g_2(1-\varphi_{\max}) \frac{dp}{dz} + F g_2 - \chi \lambda_1 \quad (2.12)$$

де q_1 - теплова енергія, що передається конвекцією від повітря до рідинного середовища, віднесена на одиницю об'єму;

$$i_{01} = i_1 + \frac{g_1^2}{2} - \text{ентальпія повного зупинення повітряного потоку}; \quad (2.13)$$

$$i_{02} = i_2 + \frac{g_2^2}{2} - \text{ентальпія повного зупинення рідинного потоку}; \quad (2.14)$$

T_n - температура насичення за відповідного тиску (залежна від значення z);

s'', s' - ентропії насиченого повітряного та рідинного середовищ при відповідному тиску.

У вхідній та центральній областях камери q_1 значення може бути орієнтовно визначене з урахуванням вимушеної конвекції для поздовжнього обтікання недеформованого циліндра:

$$q_1 = \frac{\alpha'(T_n - T_2) \sqrt{(1 - \varphi_{\max})}}{R(z)} \quad (2.15)$$

Припустімо, що температура повітряної фази дорівнює температурі насичення, тоді як температура рідини залишається постійною в перетині. Насправді температура рідких шарів рідини виявляється нижчою, а біля поверхні наближається до температури насичення. За цих умов ефективність конвективного теплообміну між повітряним потоком і рідиною істотно зменшується через утворення нагрітого поверхневого шару на струменевій поверхні [111].

Об'ємна паромісткість φ_0 характеризується площею поперечного перерізу змішувальної камери, яку займає повітряна пара у вихідному перерізі сопел при $z = 0$; профіль каналу описується аналітично у формі рівняння від z .

Конусна камера:

$$S(z) = \pi(R_{cp} - z \cdot \operatorname{tg} \beta)^2, \quad (2.16)$$

β – кут розширення (напіврозкриття) змішувальної камери;

R_{cp} – радіус перетину.

У результаті розподілу потоку рідини у перетині центральної камери формується пінистий потік. Вихідні параметри для дослідження такого потоку отримуються шляхом чисельного розв'язання відповідної залежності (2.16).

В рамках даного припущення структурна перебудова потоку не призводить до помітної конденсації, а зміна об'ємної паромісткості зумовлюється переважно варіацією швидкості потоку у поперечному перерізі центральної камери [111].

Швидкість гомогенного потоку в перетині основної камери визначають на основі рівняння збереження кількості руху:

$$\mathcal{G}'' = x\mathcal{G}'_1 + (1-x)\mathcal{G}'_2, \quad (2.17)$$

де $\mathcal{G}'_1, \mathcal{G}'_2$ – значення швидкостей повітряної та рідинної фаз у перерізі струменя перед його розпадом.

Значення густини та ступеня сухості двофазного потоку обчислюються шляхом розв'язання рівнянь безперервності:

$$\rho_{пер} = \frac{(m_1 + m_2)}{\mathcal{G}''_{пер} S_{пер}}; \quad x_{пер} = \frac{m_1}{(m_1 + m_2)}. \quad (2.18)$$

Початкова паромісткість φ_0 за перетином визначається для $\frac{\rho_1}{\rho_2} \leq 1$, як

$$\rho_{пер} = (1 - \varphi)\rho_2, \quad (2.19)$$

Ці рівняння допомагають визначити швидкість, ступінь сухості та паромісткість на вході до гомогенної ділянки за заданим перерізом. Рівняння балансу маси, імпульсу та енергії для бульбашкового гомогенного потоку подаються у наступному вигляді [111].

Залежність збереження маси:

$$\frac{d\vartheta}{\vartheta} + \frac{dS}{S} + \frac{d\rho}{\rho} = 0 \quad (2.20)$$

Диференціюючи рівняння (2.20) [111]

$$\frac{d\rho}{\rho} = -\frac{d\varphi}{(1-\varphi)} \quad (2.21)$$

поєднуємо отриману залежність в залежність (2.20) , отримаємо [111]:

$$\frac{d\vartheta}{\vartheta} = \frac{d\varphi}{(1-\varphi)} - \frac{dS}{S} \quad (2.22)$$

Рівняння імпульсного балансу з урахуванням сил тертя на стінках каналу подається у наступному вигляді:

$$dp = -\frac{(m_1 + m_2)}{S} d\vartheta - \tau_w \frac{D}{S} dz \quad (2.23)$$

де D – геометричне значення периметру каналу;

τ_w – дотичні напруження, що діють на стінки каналу.

Використовуючи рівняння (2.19) і (2.22) знаходимо [111]:

$$\frac{dp}{dz} = -\frac{(m_1 + m_2)^2}{S^2(1-\varphi)\rho_2} \left\{ -\frac{1}{S} \frac{dS}{dz} + \frac{1}{1-\varphi} \frac{d\varphi}{dz} \right\} - \tau_w \frac{D}{S}, \quad (2.24)$$

Для конічної камери змішування розглядається така система рівнянь:

$$\begin{cases} \frac{1}{S} \cdot \frac{dS}{dz} = -\frac{\operatorname{tg}\beta}{2(R_{cp} - z \cdot \operatorname{tg}\beta)}; \\ \frac{dp}{dz} = -\frac{(m_1 + m_2)^2}{S^2(1-\varphi)\rho_2} \left\{ -\frac{\operatorname{tg}\beta}{2(R_{cp} - z \cdot \operatorname{tg}\beta)} + \frac{1}{1-\varphi} \cdot \frac{d\varphi}{dz} \right\} - \tau_w \frac{D}{S} \end{cases} \quad (2.25)$$

Зв'язок між p, x і φ знаходимо із співвідношення для густини речовини, а саме:

$$\rho x = \rho_1 \varphi \quad \text{і} \quad \rho(1-x) = \rho_2(1-\varphi) \quad (2.26)$$

Поділивши перше рівняння на друге, можна отримати наступний вираз [111]:

$$\frac{x}{1-x} = \frac{\varphi}{1-\varphi} \cdot \frac{\rho_1}{\rho_2}, \quad (2.27)$$

Диференціюючи (2.27) отримаємо [111]:

$$\frac{dx}{x(1-x)} = \frac{d\varphi}{(1-\varphi)\varphi} + \frac{d\rho_1}{\rho_1}, \quad (2.28)$$

Для парової фази використовується рівняння політропи, записане у диференціальній формі, що дозволяє описати:

$$\frac{dp}{np} = \frac{d\rho_1}{\rho_1} \quad (2.29)$$

підставивши його у рівняння (2.28), одержуємо вираз, що встановлює залежність між тиском, ступенем сухості та паровмістом у такій формі:

$$\frac{dx}{x(1-x)} = \frac{d\varphi}{(1-\varphi)\varphi} + \frac{dp}{np}, \quad (2.30)$$

Ліва частина даної залежності описує швидкість відносної зміни параметрів повітряної фази, що визначається шляхом застосування залежності теплового балансу:

$$\lambda dm_1 = -\alpha(T_1 - T_2)S \quad (2.31)$$

або

$$\lambda dx = -\frac{\alpha(T_1 - T_2)S}{m_1 + m_2} \quad (2.32)$$

α - коефіцієнт тепловіддачі при конденсації,

$\frac{S}{m_1 + m_2}$ – величина поверхні бульбашок у заданому перерізі нормується на

масову витрату двофазного середовища для оцінки інтенсивності тепло- та масообміну.

Поверхня бульбашок $\frac{S}{m_1 + m_2}$ у розрахунковому перерізі може бути представлена через число бульбашок, що присутні у цьому перерізі в заданий момент [111]:

$$\frac{S}{m_1 + m_2} = \frac{N\pi d^2}{m_1 + m_2} = \frac{6x}{\rho_1 d} \frac{dz}{g} = \frac{3x}{d/2} \frac{1}{\rho_1 g} dz \quad (2.33)$$

$$\text{або} \quad \frac{dx}{x} = -\frac{3\alpha(T_1 - T_2)}{\lambda \left(\frac{d}{2}\right) \rho_1 g} dz \quad (2.34)$$

Виразивши густину повітря на основі рівняння політропного процесу та підставивши рівняння (2.35) у (2.31), одержуємо наближений вираз [111]:

$$\frac{dp}{np} = -\frac{d\varphi}{(1-\varphi)\varphi} - \frac{3\alpha(T_1 - T_2)}{\lambda(d/2)\rho_{1nep}\left(\frac{p}{p_{nep}}\right)^{1/n}g} dz \quad (2.36)$$

Рівняння (2.25) і (2.35) встановлюють залежність тиску від об'ємної паромісткості та параметрів прохідного каналу. Поєднавши ці рівняння, маємо:

$$\frac{dp}{dz} = -\frac{(m_1 + m_2)^2}{S^2(1-\varphi)\rho_2} \cdot \frac{1}{S} \frac{dS}{dz} + \frac{(m_1 + m_2)^2 \varphi}{S^2(1-\varphi)\rho_2 n} \cdot \frac{dp}{pdz} - L_Q \varphi - \tau_w \frac{D}{S} \cdot \frac{(m_1 + m_2)^2}{S^2(1-\varphi)\rho_2} \quad (2.37)$$

де $L_Q = \frac{3\alpha(T_1 - T_2)}{\lambda(d/2)\rho_{1nep}\left(\frac{p}{p_{nep}}\right)^{1/n}g}$ – тепловий множник, або в такій заженості:

$$\frac{dp}{dz} = -\frac{\frac{(m_1 + m_2)^2}{S^2(1-\varphi)\rho_2} \left[\frac{1}{S} \cdot \frac{dS}{dz} + L_Q - \tau_w \frac{D}{S} \right]}{1 - \frac{(m_1 + m_2)^2 \varphi}{S^2(1-\varphi)\rho_2 np}} \quad (2.38)$$

Швидкість звуку в двофазному пінистому потоці при відсутності фазових змін має вигляд:

$$a = \left[\frac{np}{\varphi(1-\varphi)\rho_2} \right]^{1/2} \quad (2.39)$$

Остання залежність впливу на тиск, може бути знайдена із рівняння:

$$\frac{dp}{dz} = -\frac{g^2 \rho \left[\frac{1}{S} \cdot \frac{dS}{dz} + L_Q - \tau_w \frac{D}{S} \right]}{1 - M^2}, \quad (2.40)$$

де M – число Маха, розраховане за величиною швидкості звуку у двокомпонентному потоці.

Інтегрування залежності (2.40) за допомогою програмного забезпечення Maple 9.5, отримуємо формулу, яка описує взаємозв'язок між тиском суміші на виході з камери змішування та її довжиною [111].

$$p(Z) = -C_3 e^{\frac{g^2 \rho [1 + L_Q S - \pi \cdot \tau_w D] l_2}{S(M-1)(M+1)}}. \quad (2.41)$$

де l_2 – довжина центральної, головної області змішувальної камери.

Коефіцієнт C_3 визначається за умов, що на вході в камеру змішування піногенератора $l_2 = 0$, і тоді $p(0) = -C_3$ і тому $C_3 = -p_2(z)$ [111].

За фіксованого значення коефіцієнта C_3 рівняння (2.41) дозволяє на етапі попереднього проектування та формування паспорту, для проведення робіт з освоєння свердловин з важкими вуглеводнями, із застосуванням пінистих сумішей, прогнозувати величину тиску пінистого розчину на виході з пристрою ежекційного типу, що має визначену довжину камери змішування. При цьому довжина камери змішування, призначеної для інтеграції рідини з повітрям, суттєво впливає на експлуатаційні параметри зазначеного пристрою. Для досягнення максимальної ефективності важливим є раціональний підхід до вибору оптимальної довжини камери змішування.

Раціональний підхід до визначення раціональної довжини камери змішування є ключовим для досягнення максимальної ефективності [111].

Визначення довжини змішувальної камери здійснюється на основі наступного виразу:

$$L_k = l_1 + l_2, \quad (2.42)$$

де l_1 – довжина вхідної зони змішувальної камери;

l_2 – довжина центральної, головної зони змішувальної камери.

Для визначення довжини вхідної зони змішувальної камери застосовується наступна залежність:

$$l_1 = Z_1 + Z_2. \quad (2.43)$$

Відносна довжина вхідної частини робочого потоку в змішувальній камері піногенератора визначається відповідно до такої залежності:

$$Z_1/D = \frac{4,188}{K_{nn}^{0,5}} \left[1 - 0,379 \left(1 - \frac{1,032u}{K_{nn} - 1} \right) \right], \quad (2.44)$$

де u – ежекційне відношення;

K_{nn} – геометричний параметр змішувальної камери піногенератора здійснюється за такою залежністю:

$$K_{nn} = \frac{S}{S_2} \quad (2.45)$$

де S – площа перерізу у змішувальній камері;

S_2 – площа перерізу сопла для подачі рідинного потоку.

Відносну довжину зони змішувальної камери, на вихідному перетину якого з'єднуються кінці робочого потоку зі стінками, можна розрахувати за такою формулою.

$$Z_2/D = \frac{0,232(1 - 3,278K_{nn}^{-1}) \left[1 + 2,893u(K_{nn} - 1)^{-1} \ln(0,305K_{nn}^{0,5}) \right]}{K_{nn}^{0,5} \ln \left[\frac{1+u}{0,257K_{nn}} - \frac{2,891u}{K_{nn} - 1} \right]^{-1}}, \quad (2.46)$$

Найбільш точне співпадіння з експериментальними спостереженнями для відносної довжини основної ділянки спостерігається при використанні емпіричної залежності:

$$l_2/D = 18,36 M_R^{-0,181}, \quad (2.47)$$

де M_R – співвідношення імпульсу повітряного потоку на кінці сопла до імпульсу потоку рідини, визначається за залежністю:

$$M_R = \frac{\rho_2 g_2}{\rho_1 g_1}. \quad (2.48)$$

Результати обчислень, виконаних у математичному програмному пакеті Maple-9.5, представлені на рисунках 2.4–2.13. Відображається робота бурового насоса для кожного режиму, а також для різних діаметрів багатосоплових вставок в піногенераторі [111].

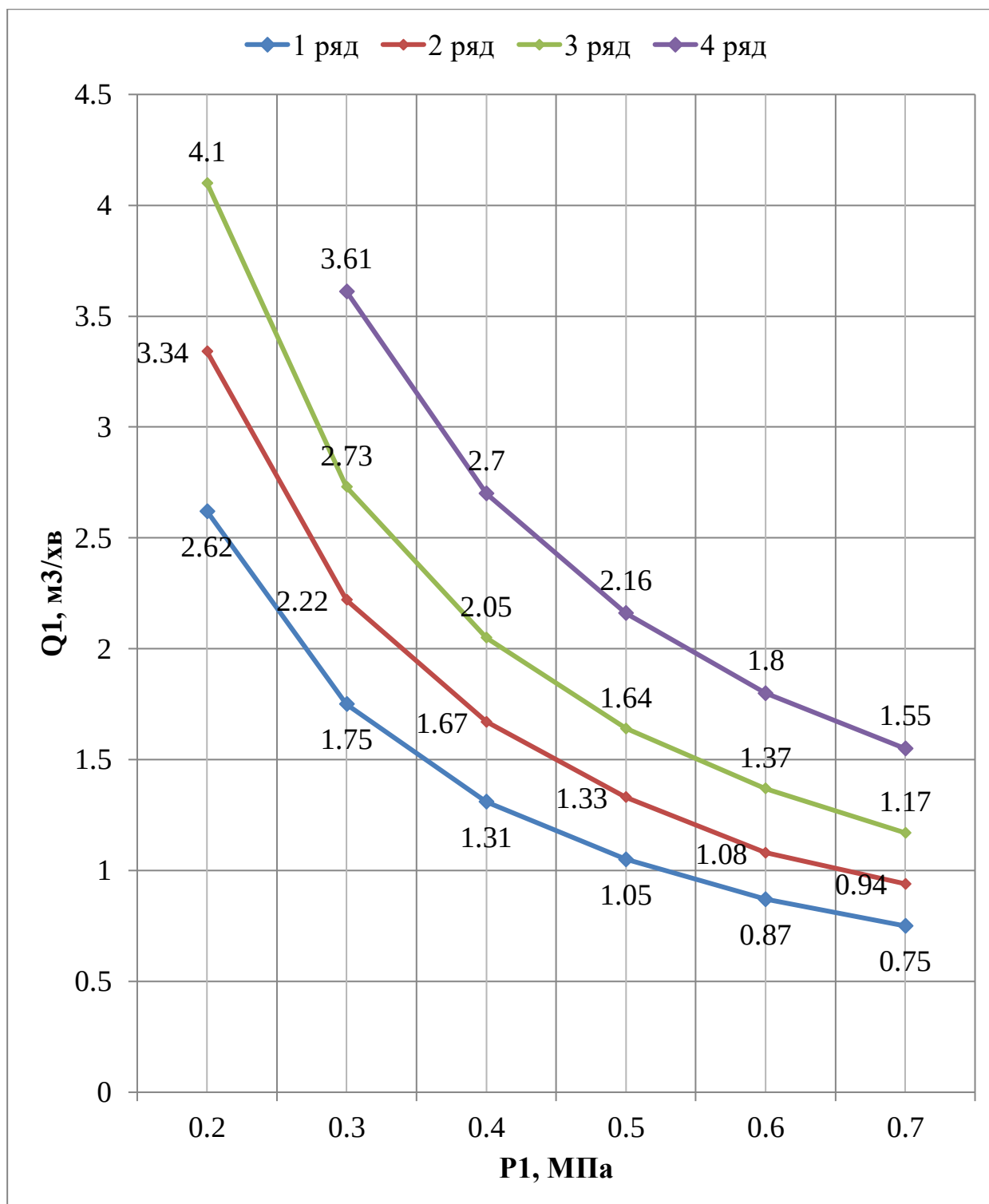


Рисунок 2.4 – Аналітична залежність витрати повітря Q_1 від його тиску P_1 при $d_c=4$ мм:

1 ряд– $P_2=13$ МПа; $Q_2=8,8 \cdot 10^{-3}$ м³/с; 2 ряд– $P_2=10$ МПа; $Q_2=11,20 \cdot 10^{-3}$ м³/с;
 3 ряд– $P_2=8$ МПа; $Q_2=13,75 \cdot 10^{-3}$ м³/с; 4 ряд– $P_2=6$ МПа; $Q_2=18,15 \cdot 10^{-3}$ м³/с

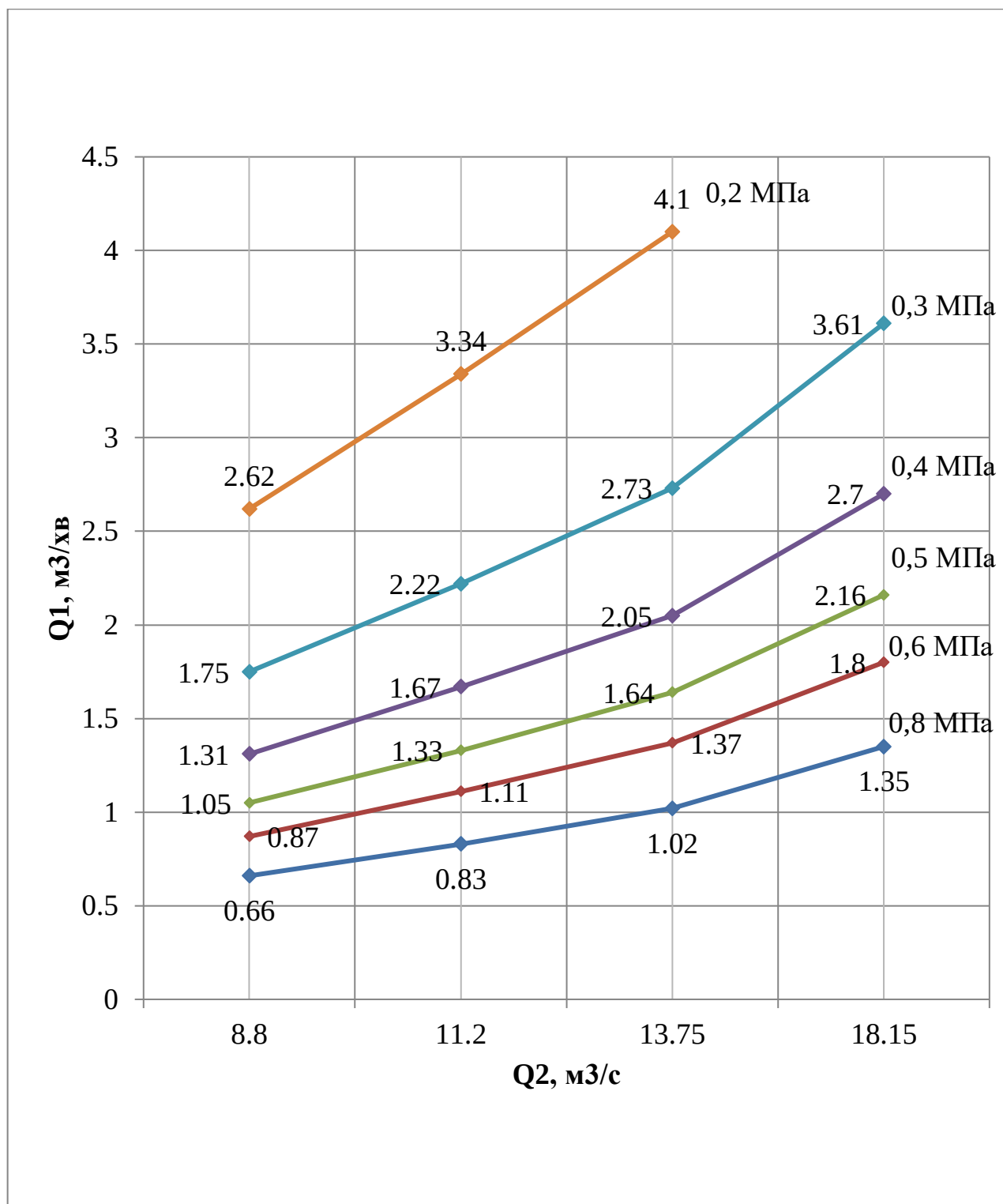


Рисунок 2.5 – Аналітична залежність витрати повітря Q_1 від витрати рідини Q_2 при $d_{с.}=4$ мм

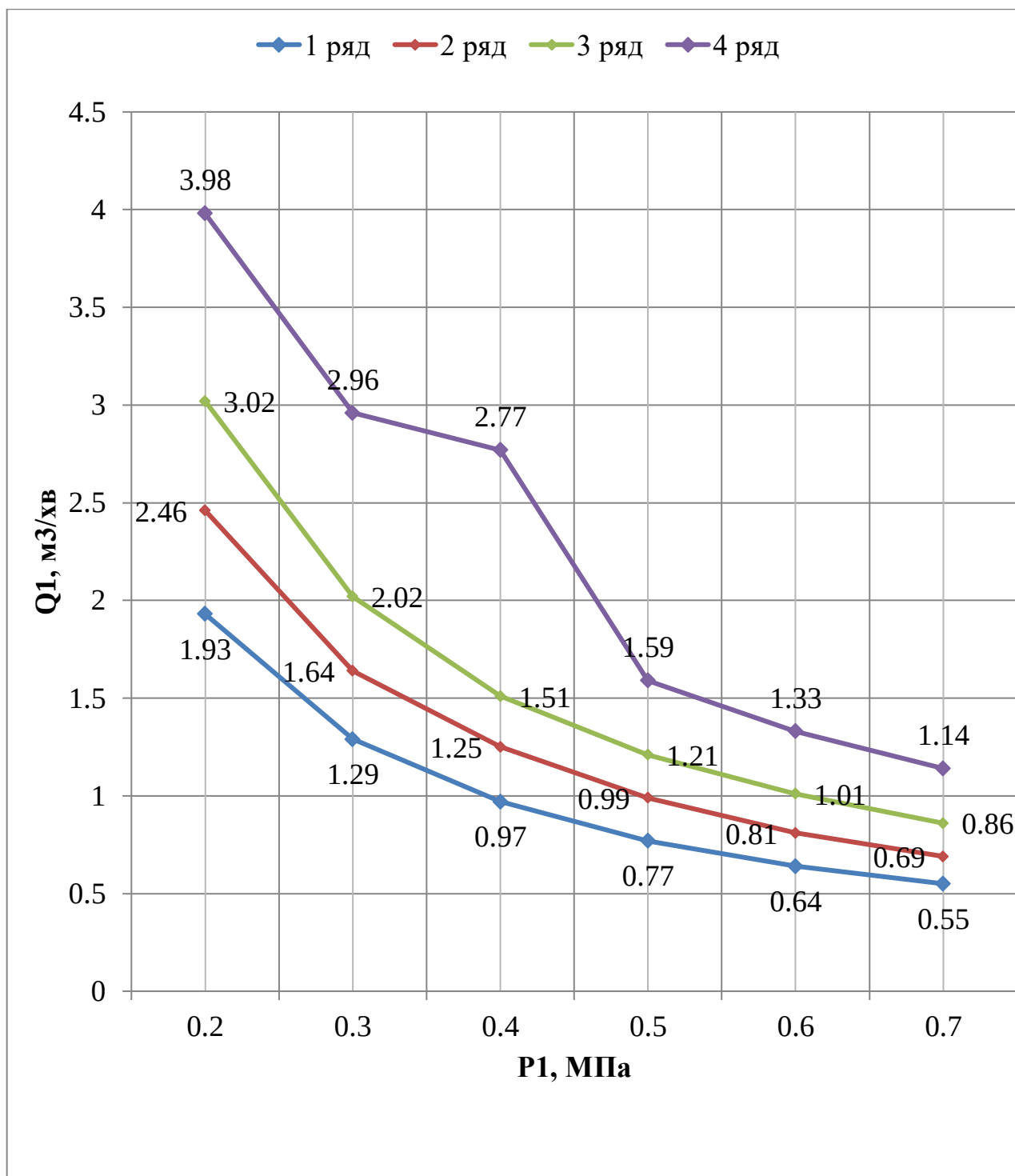


Рисунок 2.6 – Аналітична залежність витрати повітря Q_1 від його тиску P_1 при $d_{с.}=4$ мм:

1 ряд- $P_2=16$ МПа; $Q_2=6,49 \cdot 10^{-3}$ м³/с; 2 ряд- $P_2=13$ МПа; $Q_2=8,25 \cdot 10^{-3}$ м³/с

3 ряд- $P_2=10$ МПа; $Q_2=10,15 \cdot 10^{-3}$ м³/с; 4 ряд- $P_2=8$ МПа; $Q_2=13,37 \cdot 10^{-3}$ м³/с

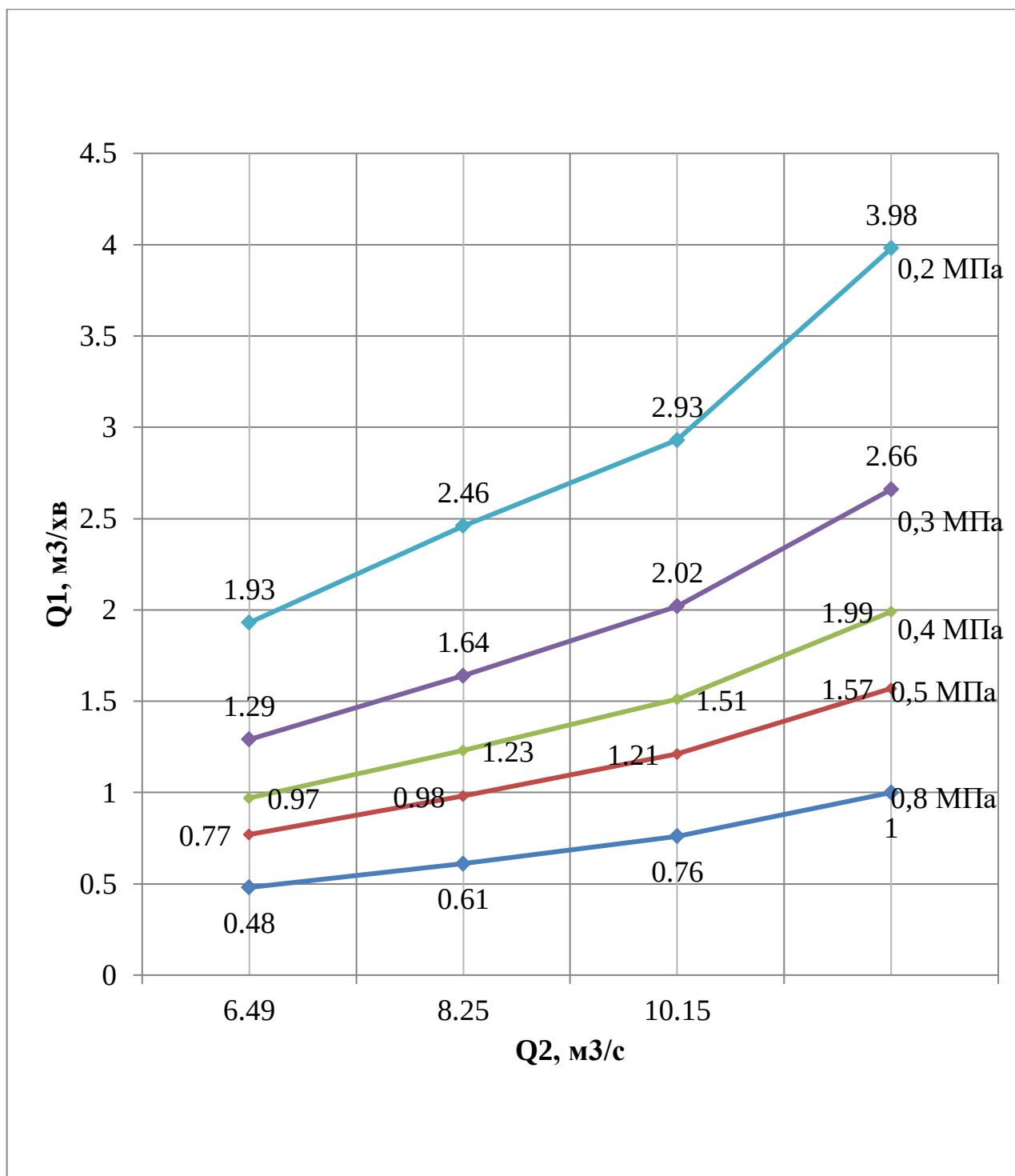


Рисунок 2.7 – Аналітична залежність витрати повітря Q_1 від витрати рідини Q_2 при $d_{с.}=4$ мм

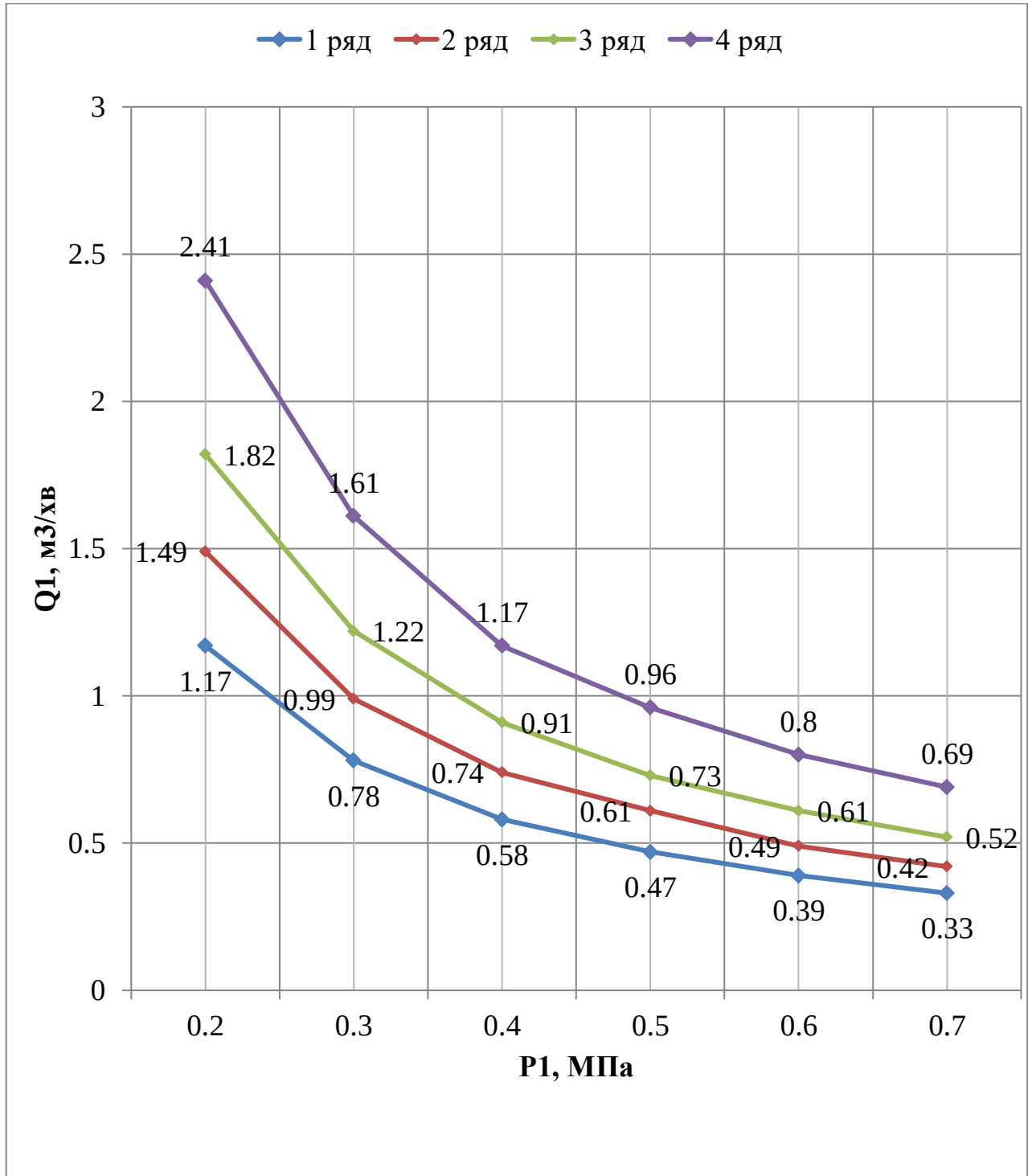


Рисунок 2.8 – Аналітична залежність витрати повітря Q_1 від його тиску P_1 при $d_{с.}=6$ мм:

1 ряд- $P_2=13$ МПа; $Q_2=8,8 \cdot 10^{-3}$ м³/с; 2 ряд- $P_2=10$ МПа; $Q_2=11,20 \cdot 10^{-3}$ м³/с;

3 ряд- $P_2=8$ МПа; $Q_2=13,75 \cdot 10^{-3}$ м³/с; 4 ряд- $P_2=6$ МПа; $Q_2=18,15 \cdot 10^{-3}$ м³/с

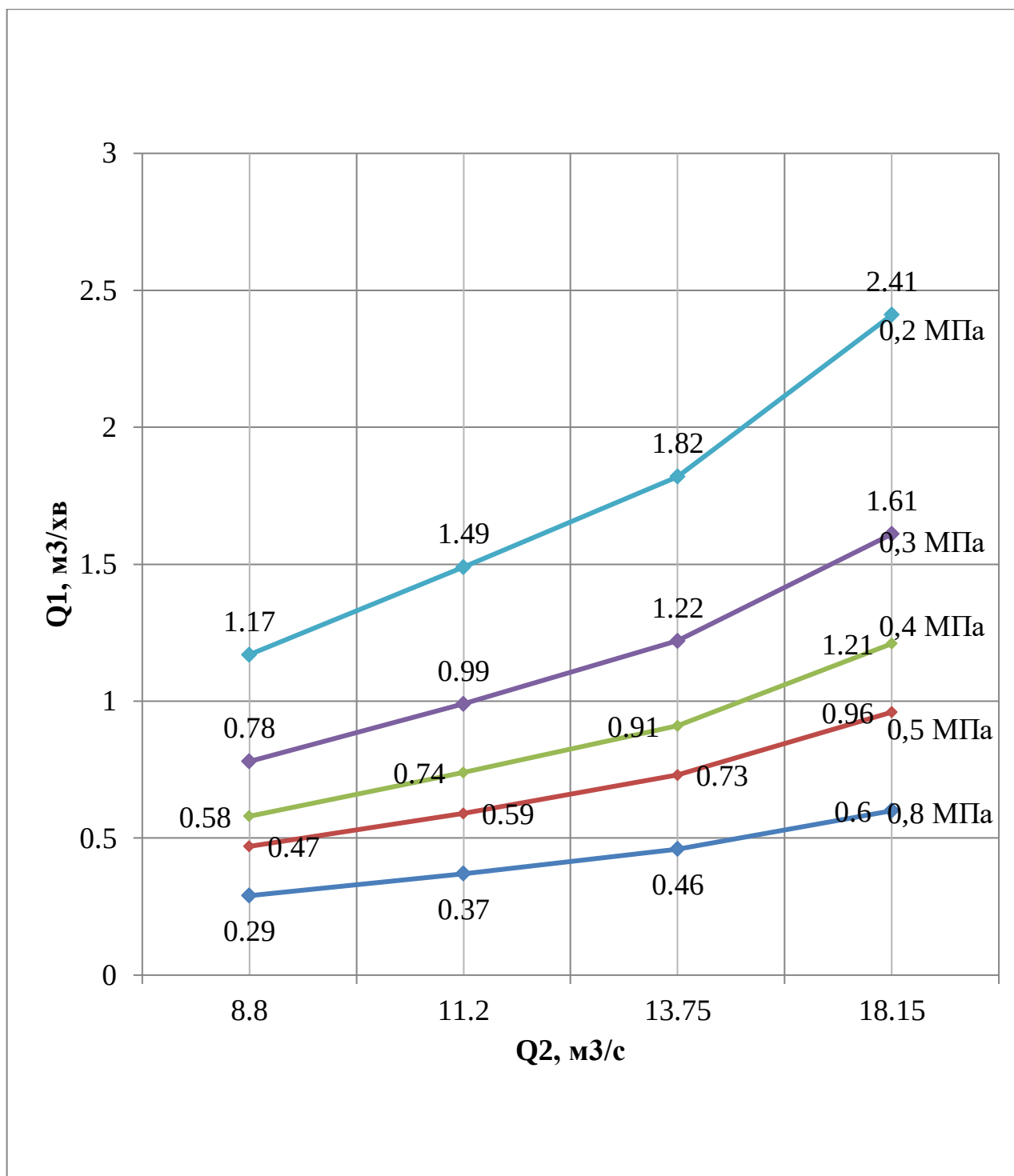


Рисунок 2.9 – Аналітична залежність витрати повітря Q_1 від витрати рідини Q_2 при $d_{с.}=6$ мм

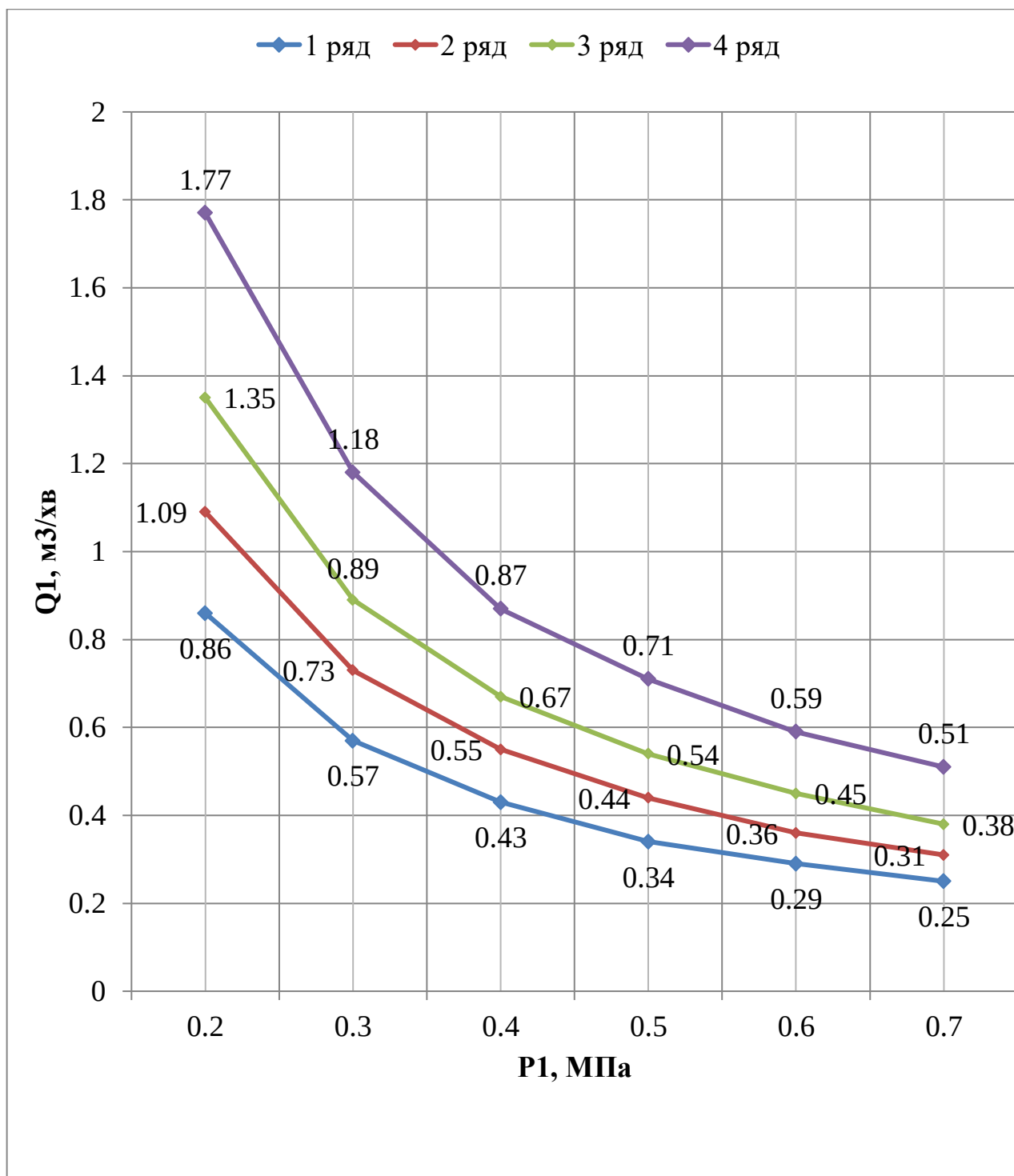


Рисунок 2.10 – Аналітична залежність витрати повітря Q_1 від його тиску P_1 $d_{с.}=6$ мм

1 ряд - $P_2=16$ МПа; $Q_2=6,49 \cdot 10^{-3}$ м³/с; 2 ряд- $P_2=13$ МПа; $Q_2=8,25 \cdot 10^{-3}$ м³/с

3 ряд - $P_2=10$ МПа; $Q_2=10,15 \cdot 10^{-3}$ м³/с; 4 ряд- $P_2=8$ МПа; $Q_2=13,37 \cdot 10^{-3}$ м³/с

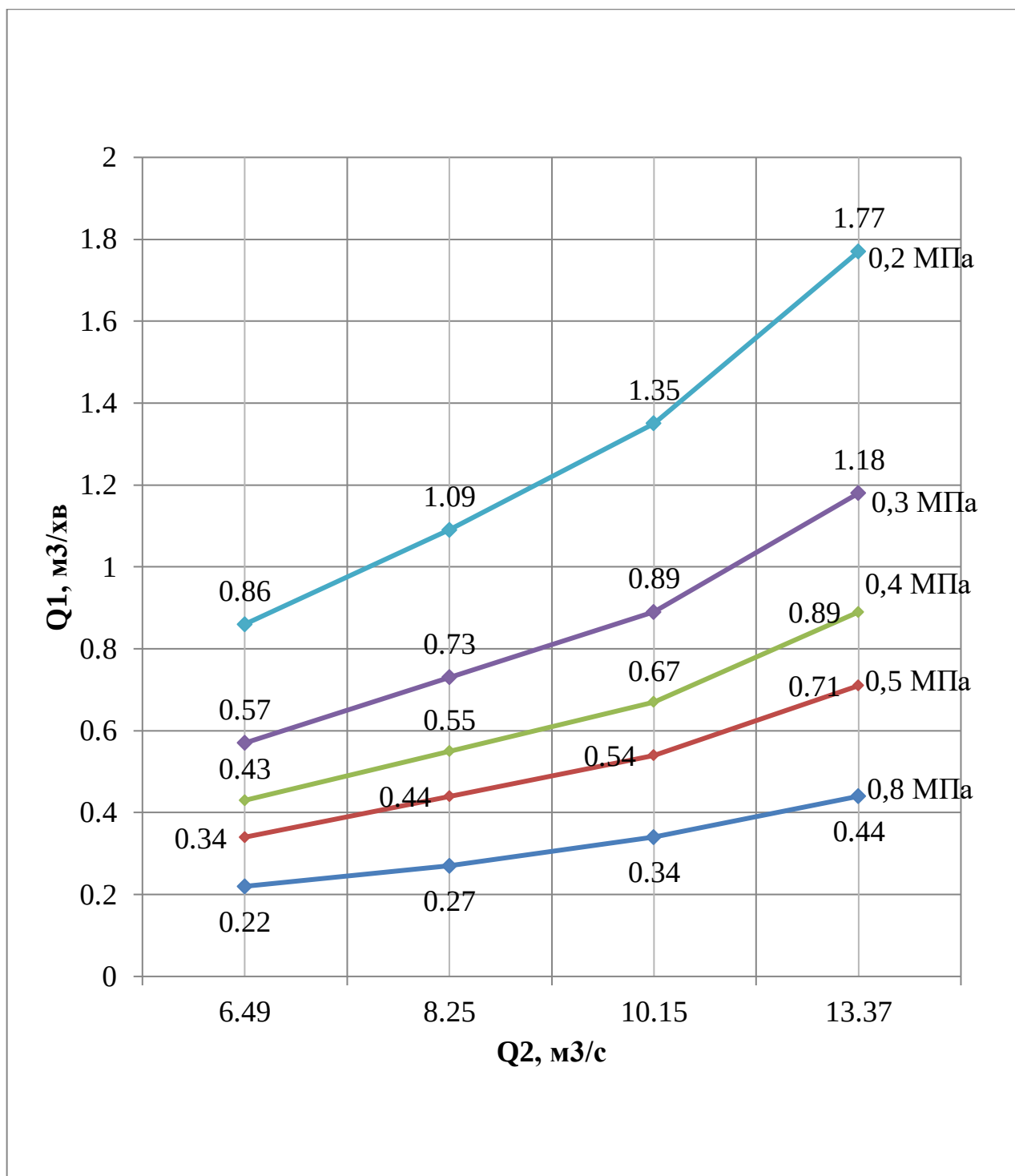


Рисунок 2.11 – Аналітична залежність витрати повітря Q_1 від витрати рідини Q_2 при $d_c=6$ мм

Для визначення тиску пінистого розчину, що виходить із піногенератора використовуємо програму “Maple 9,5”(рис. 2.12).

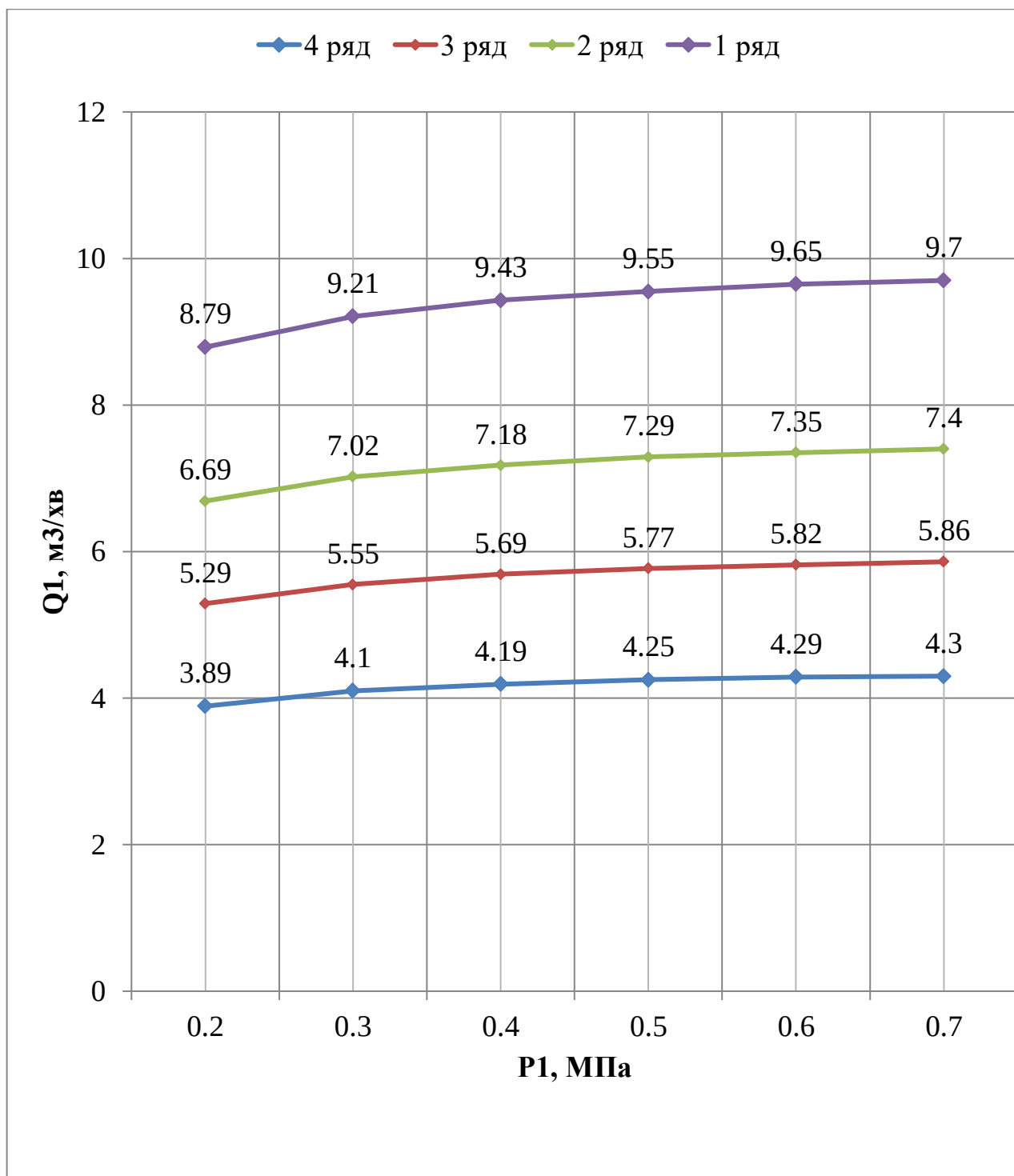


Рисунок 2.12 – Аналітичні дані тиску пінистого розчину на виході із піногенератора для режиму роботи насоса на максимальну подачу:

1 ряд - $P_2=13$ МПа; $Q_2=8,8 \cdot 10^{-3}$ м³/с; 2 ряд- $P_2=10$ МПа; $Q_2=11,20 \cdot 10^{-3}$ м³/с

3 ряд - $P_2=8$ МПа; $Q_2=13,75 \cdot 10^{-3}$ м³/с; 4 ряд- $P_2=6$ МПа; $Q_2=18,15 \cdot 10^{-3}$ м³/с

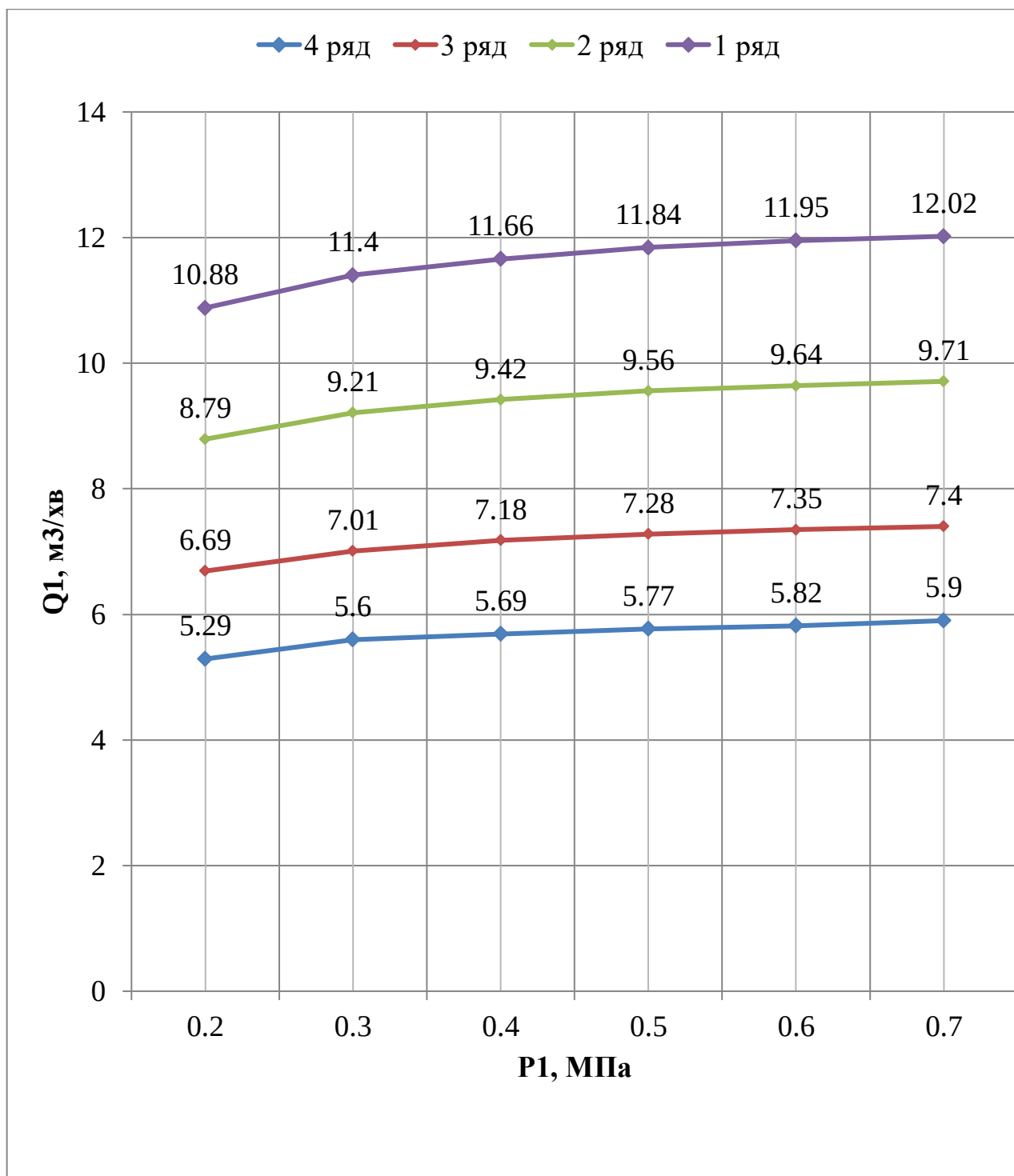


Рисунок 2.13 – Аналітичні дані тиску пінистого розчину на виході із піногенератора для режиму роботи насоса на максимальний тиск:

1 ряд - $P_2=16$ МПа; $Q_2=6,49 \cdot 10^{-3}$ м³/с; 2 ряд - $P_2=13$ МПа; $Q_2=8,25 \cdot 10^{-3}$ м³/с;
 3 ряд - $P_2=10$ МПа; $Q_2=10,15 \cdot 10^{-3}$ м³/с; 4 ряд - $P_2=8$ МПа; $Q_2=13,37 \cdot 10^{-3}$ м³/с

Аналізуючи представлені аналітичні графічні залежності (рисунки 2.4–2.13), при кожному режимі роботи бурового насоса і різних діаметрах отворів багатосоплових вставок піногенератора наведено графіки залежності витрати повітря від його тиску. Графіки розроблено для оптимальних діаметрів отворів вставок, які становлять 4 і 6 мм, визначених у процесі дослідження роботи піногенератора. Також проаналізовано залежності витрати повітря від об'єму подачі рідини буровим насосом (рисунки 2.5, 2.7, 2.9, 2.11). [111].

Для визначення тиску пінистого розчину на виході із піногенератора показані залежності, для режимів роботи бурового насоса на максимальну подачу і максимальний тиск (рис. 2.12, 2.13).

Отримані залежності дозволяють вибирати режими роботи компресора при заданих режимах роботи бурового насоса для отримання піни з оптимальними характеристиками.

Таким чином, для графіків (рис. 2.4–2.13) спостерігається закономірність, що полягає у зростанні витрати повітря пропорційно до підвищення тиску його подачі та витрати рідини. Особливу увагу заслуговує виявлення явища "відриву" кривих при значеннях тиску 0,2 МПа, що помітно відокремлює їх від інших масивів отриманих графіків. Зазначене явище характерне для графічних залежностей, представлених на рисунках 2.5, 2.7, 2.9, 2.11. Виявлена особливість відкриває перспективи для подальших досліджень із використанням методу комп'ютерного моделювання, а також для вдосконалення розробленого обладнання в контексті оптимізації його робочих параметрів [111].

2.3 Дослідження обладнання блоку очистки промивальної рідини з аналізом енергоефективності піногенераторів за умов змінного тиску та витрат рідини

Енергоефективність роботи піногенераторів визначається здатністю утворювати піну з мінімальними втратами енергії при заданих параметрах тиску та витрати на вході й виході [108].

Одним із ключових завдань сучасної інженерної практики є дослідження впливу змін робочих умов – зокрема тиску та витрати рідини – на ефективність функціонування піногенераторів.

За допомогою чисельного моделювання в середовищі FlowSimulation (SolidWorks) розглянемо параметр оцінювання енергоефективності C , як співвідношення енергії потоків рідини, повітря і піни[108].

Проведемо аналіз функціонування піногенераторів за різних експлуатаційних режимів. Отримані результати дозволять визначити раціональні значення витрати рідини та тиску, за яких забезпечується максимальна енергоефективність, що має важливе практичне значення для вдосконалення існуючих систем очищення. Для розрахунку коефіцієнта енергоефективності застосовуємо наступну формулу:

$$C = \frac{p_3 Q_3}{p_1 Q_1 + p_2 Q_2} \quad (2.49)$$

p_1, Q_1 – відповідно тиск і витрата рідинного струменя на вході в піногенератор;

p_2, Q_2 – відповідно тиск і витрата повітряного струменя на вході в піногенератор;

p_3, Q_3 – відповідно тиск і витрата пінного струменя на виході з піногенератора.

Для розрахунків використано отримані результати за допомогою програми FlowSimulation, що є прикладним модулем SolidWorks.

Проведено дослідження витрати рідини від 0,001 до 0,025 м³/с при різних тисках піни на виході піно генератора [108].

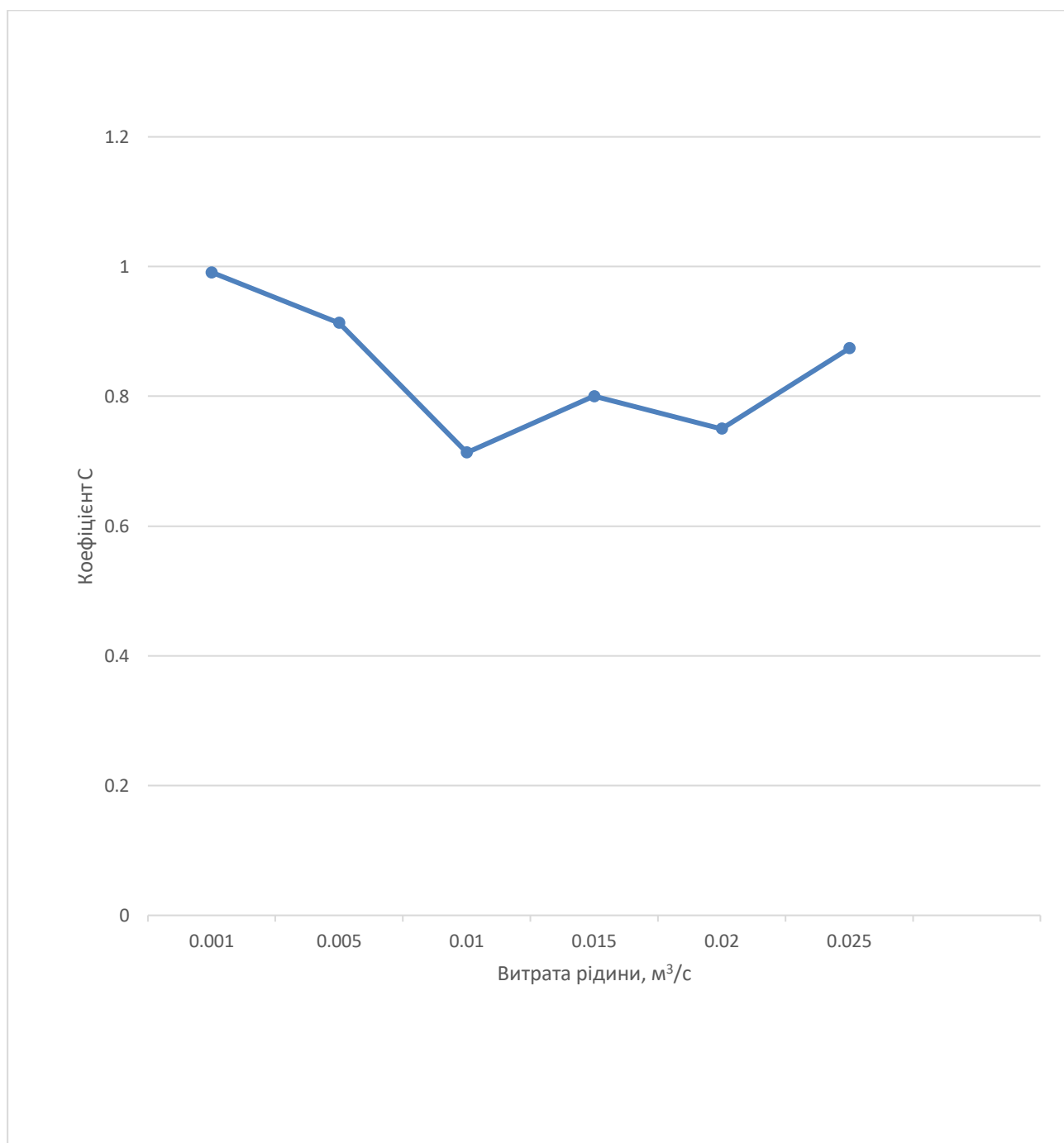


Рисунок 2.14 – Аналітичні значення коефіцієнта енергоефективності при тиску піни на виході 6 МПа.

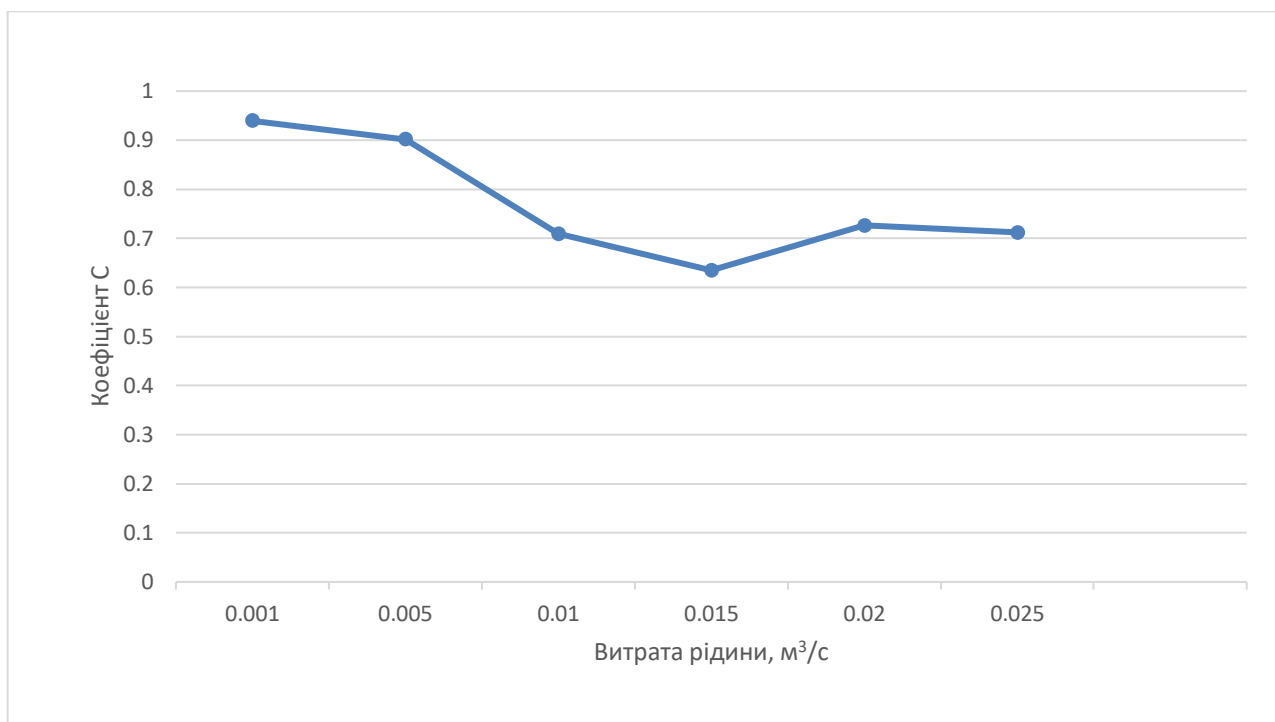


Рисунок 2.15 – Аналітичні значення коефіцієнта енергоефективності при тиску піни на виході 7 МПа

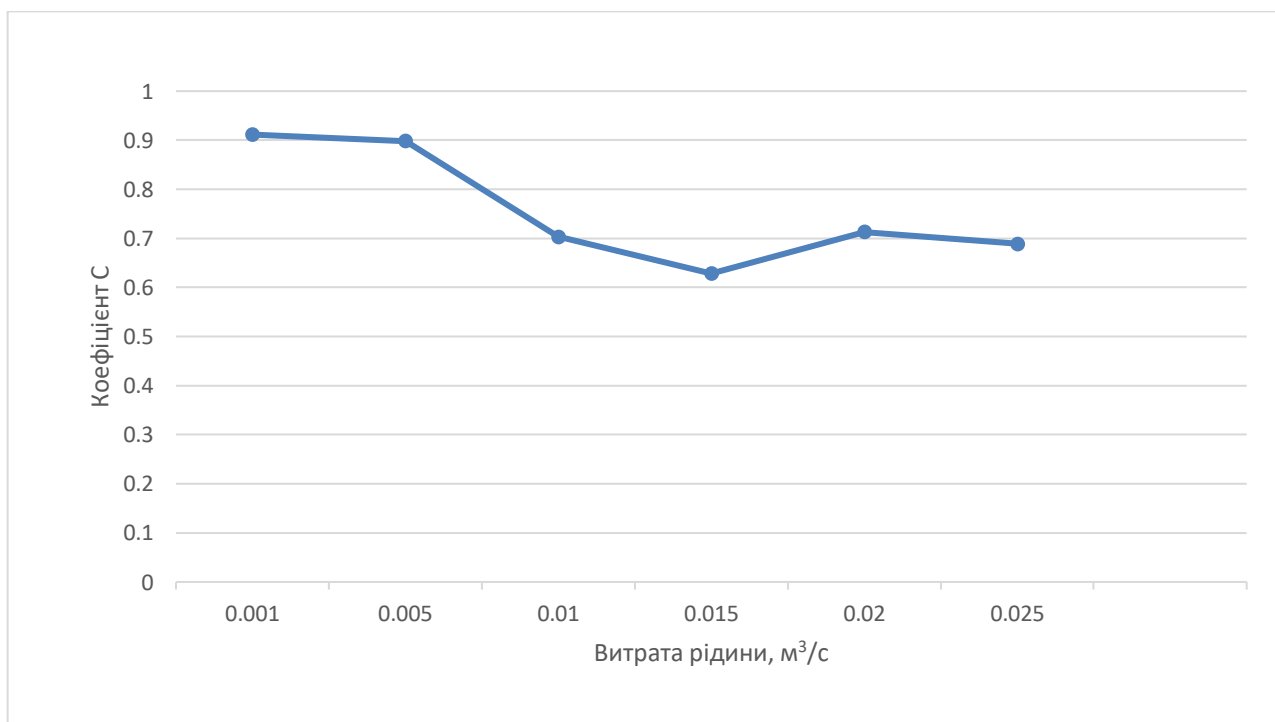


Рисунок 2.16 – Аналітичні значення коефіцієнта енергоефективності при тиску піни на виході 8 МПа

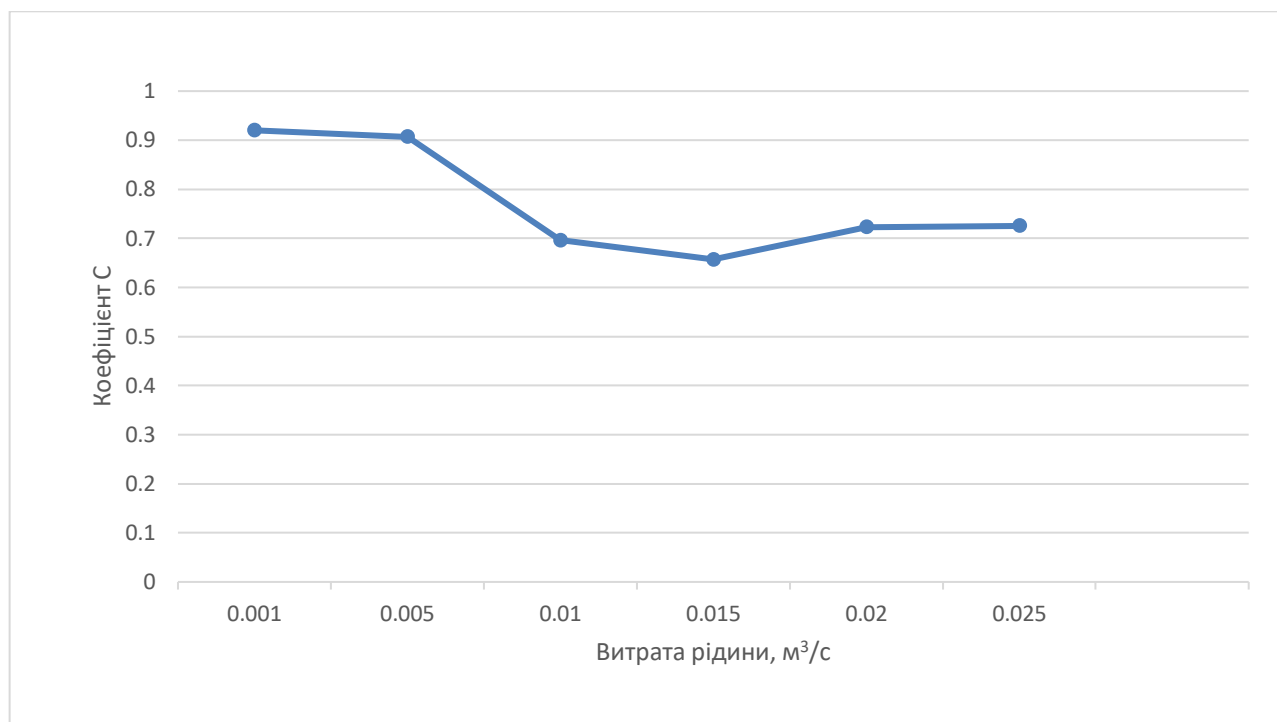


Рисунок 2.17 – Аналітичні значення коефіцієнта енергоефективності при тиску піни на виході 9 МПа

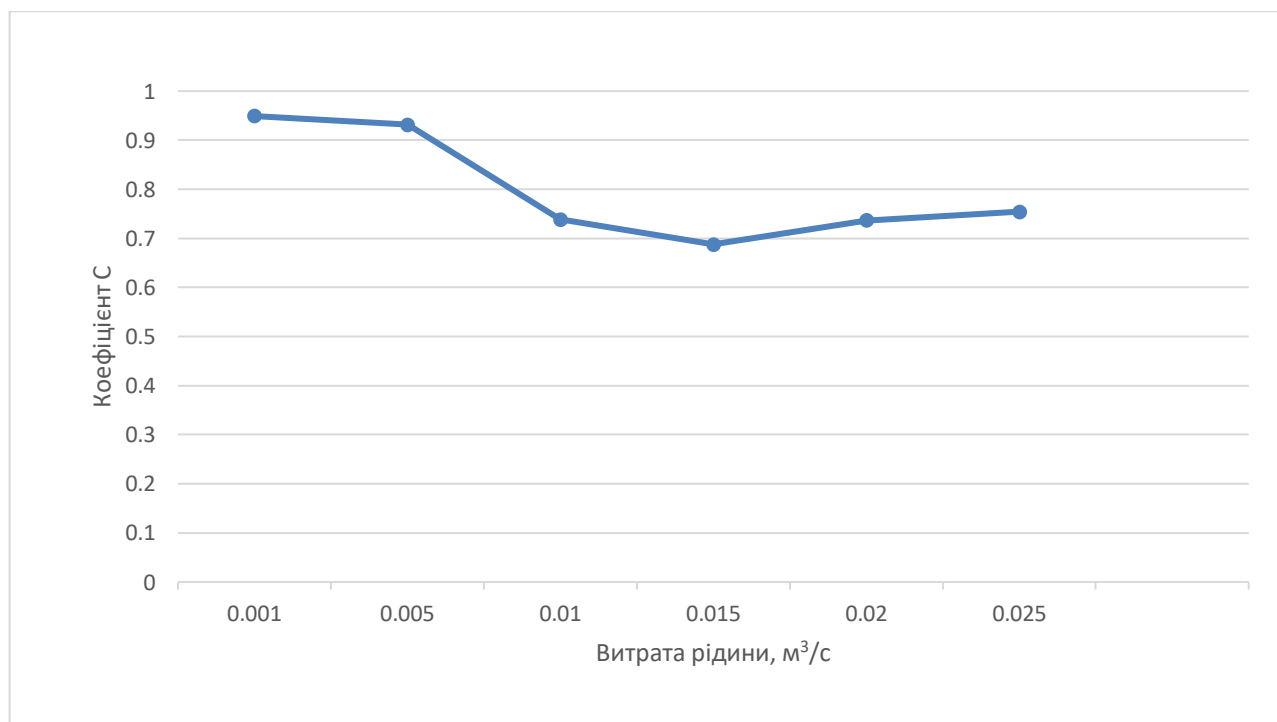


Рисунок 2.18 – Аналітичні значення коефіцієнта енергоефективності при тиску піни на виході 10 МПа

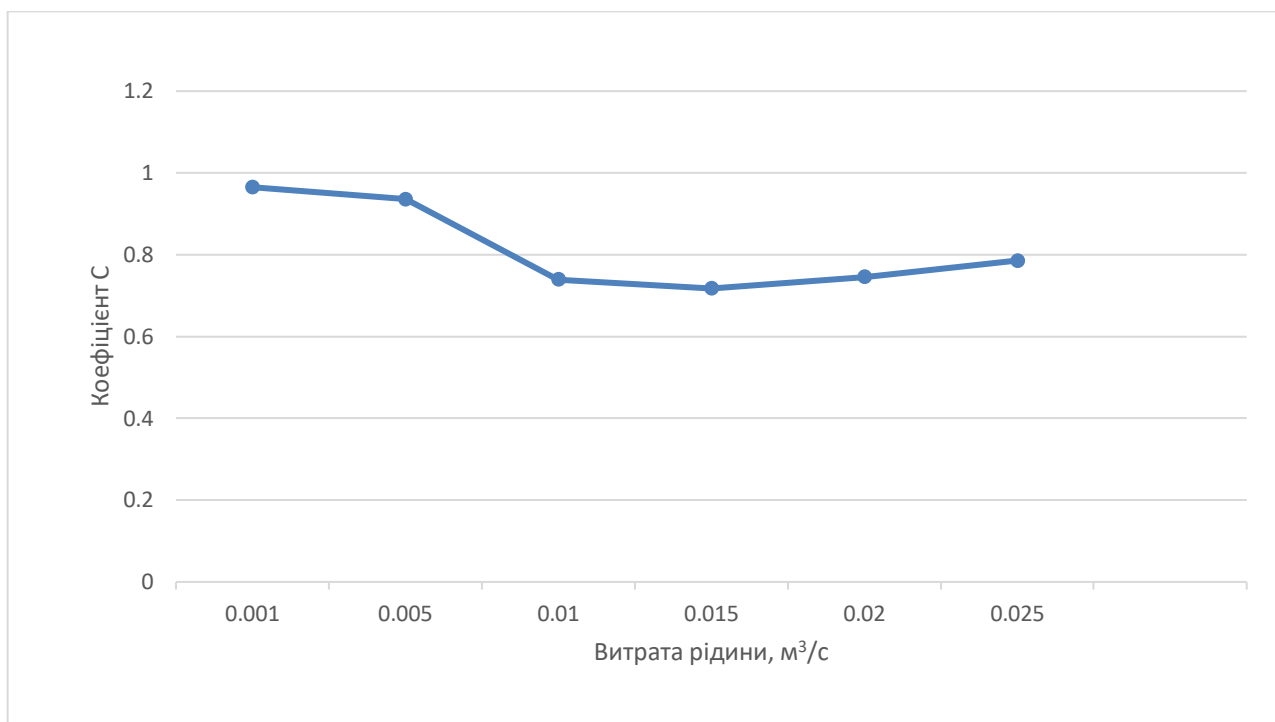


Рисунок 2.19 – Аналітичні значення коефіцієнта енергоефективності при тиску піни на виході 11 МПа

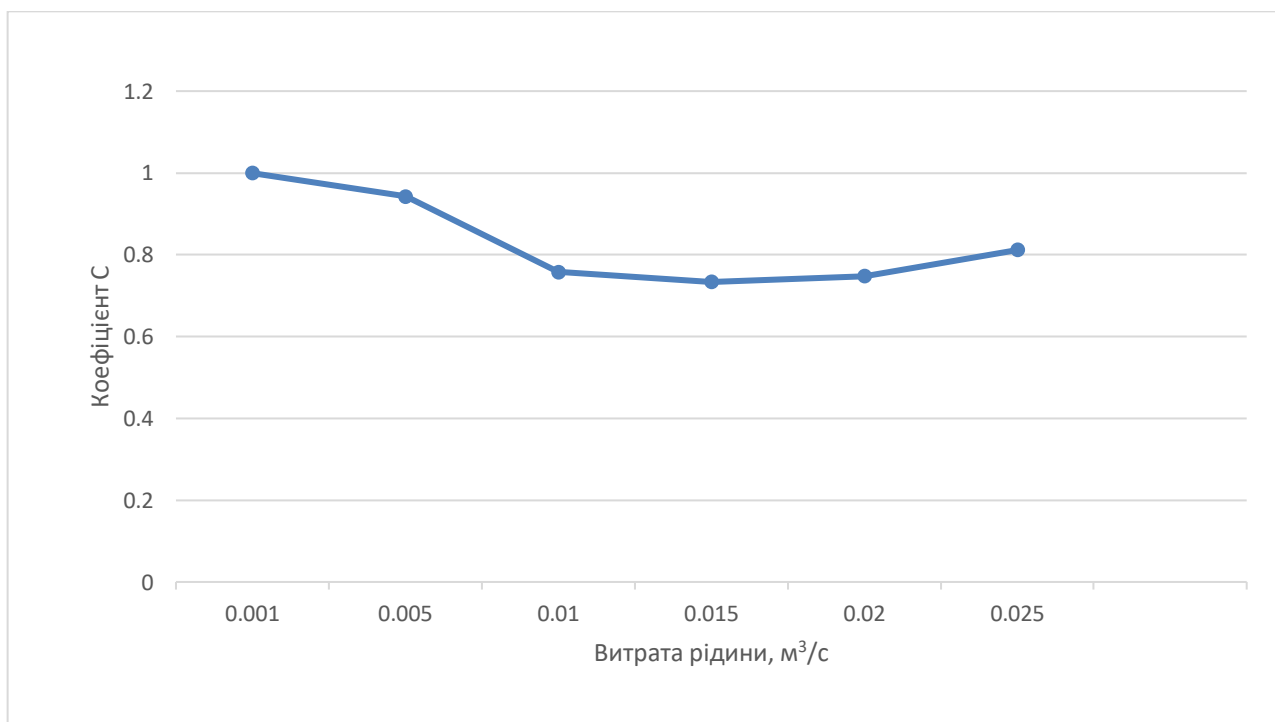


Рисунок 2.20 – Аналітичні значення коефіцієнта енергоефективності при тиску піни на виході 12 МПа

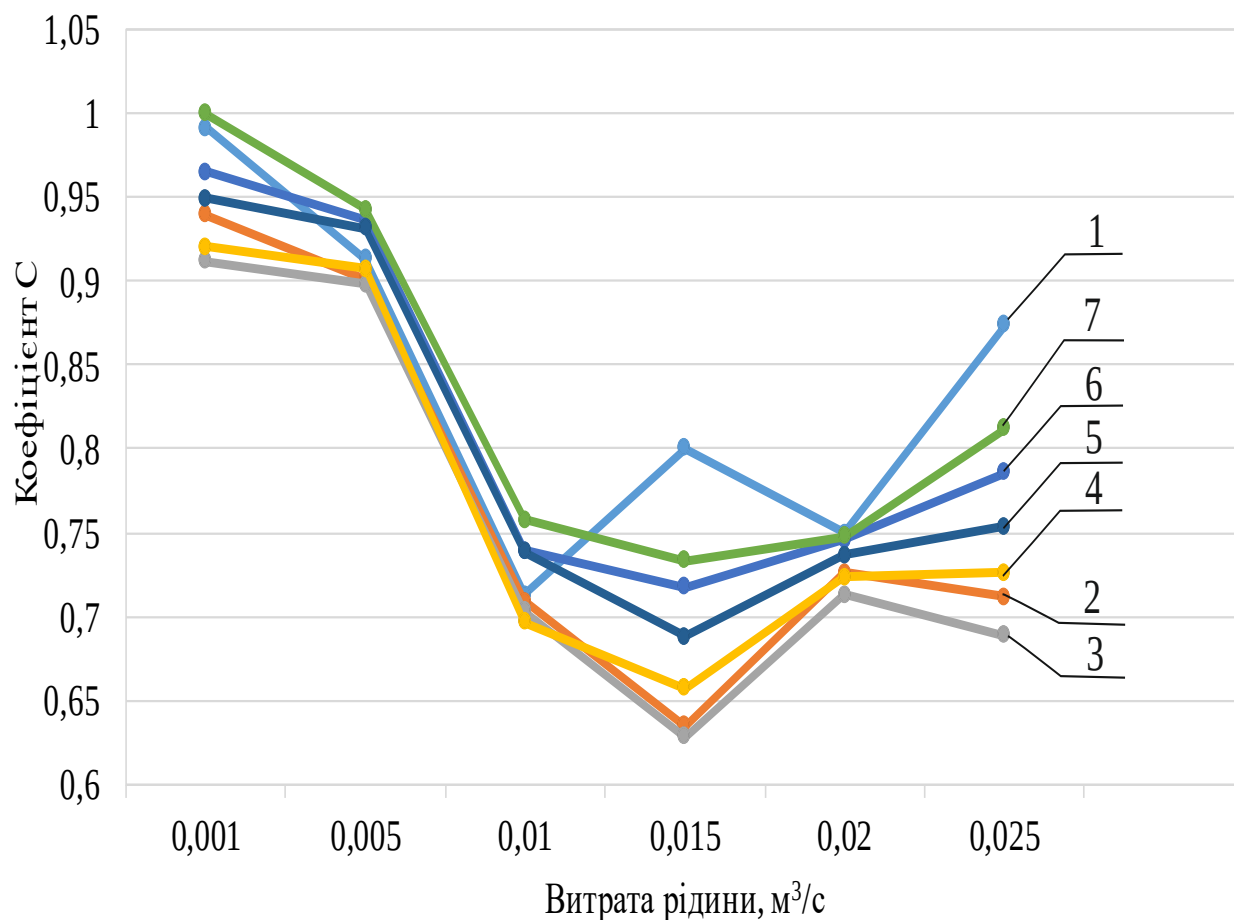


Рисунок 2.21 – Аналітичні значення коефіцієнта енергоефективності при різних тисках піни на виході:

1 – 6 МПа; 2 – 7 МПа; 3 – 8 МПа; 4 – 9 МПа; 5 – 10 МПа; 6 – 11 МПа;
7 – 12 МПа

Проведені дослідження підтверджують енергоефективність піногенератора.

Тиск піни на виході змінювався в робочих режимах піногенератора від 6 до 12 МПа. Витрата рідини змінювалась залежно від зміни робочої насадки в соплах піногенератора.

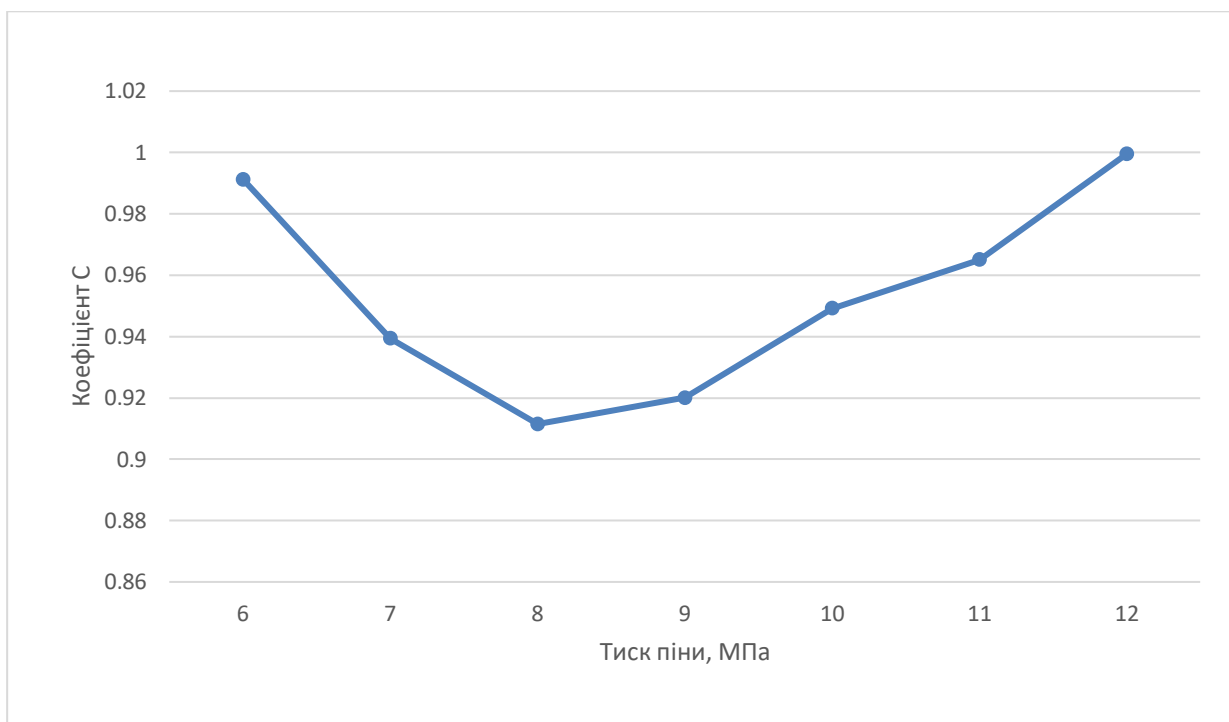


Рисунок 2.22 – Аналітичні значення коефіцієнта енергоефективності при витраті рідини $0,001 \text{ м}^3/\text{с}$

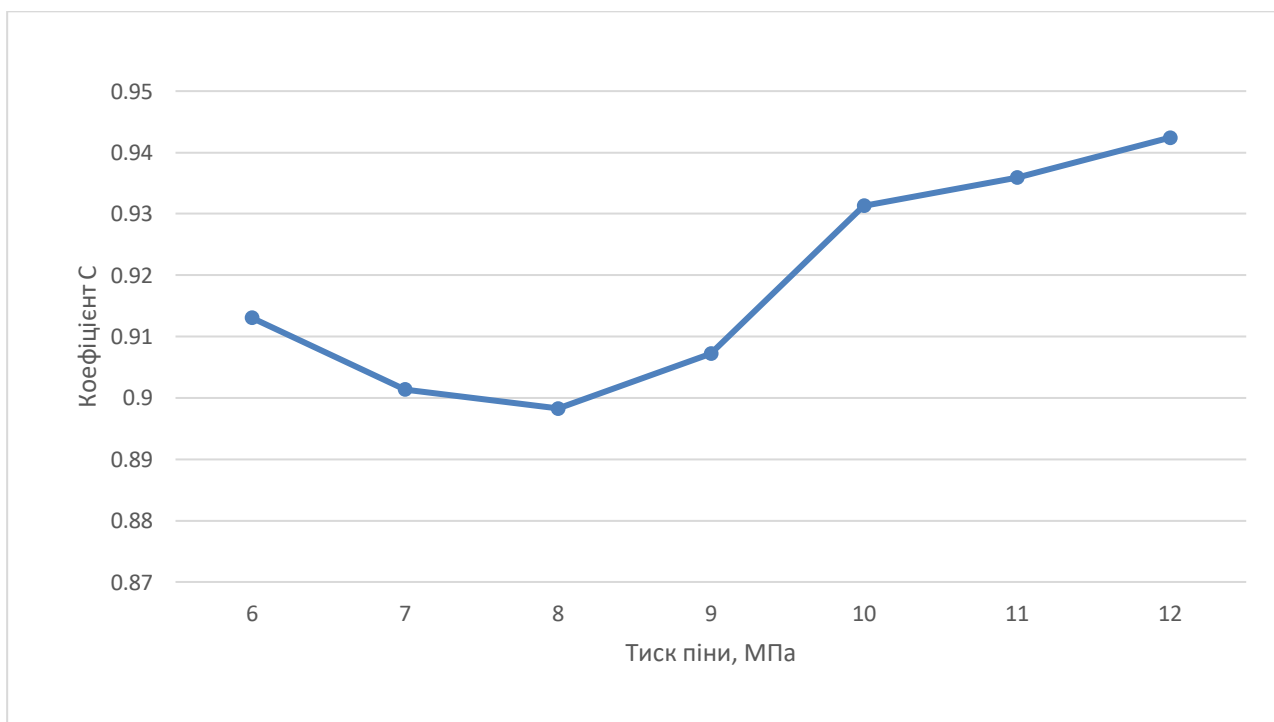


Рисунок 2.23 – Аналітичні значення коефіцієнта енергоефективності при витраті рідини $0,005 \text{ м}^3/\text{с}$

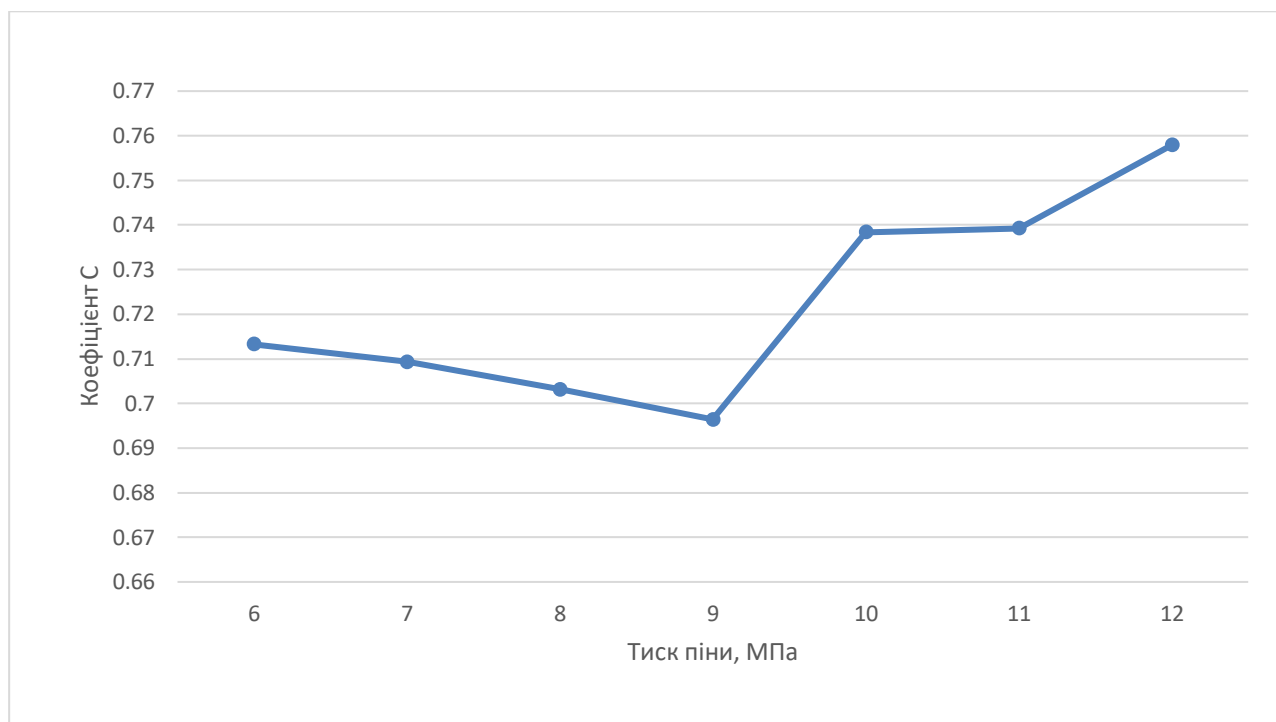


Рисунок 2.24 – Аналітичні значення я коефіцієнта енергоефективності при витраті рідини $0,01 \text{ м}^3/\text{с}$

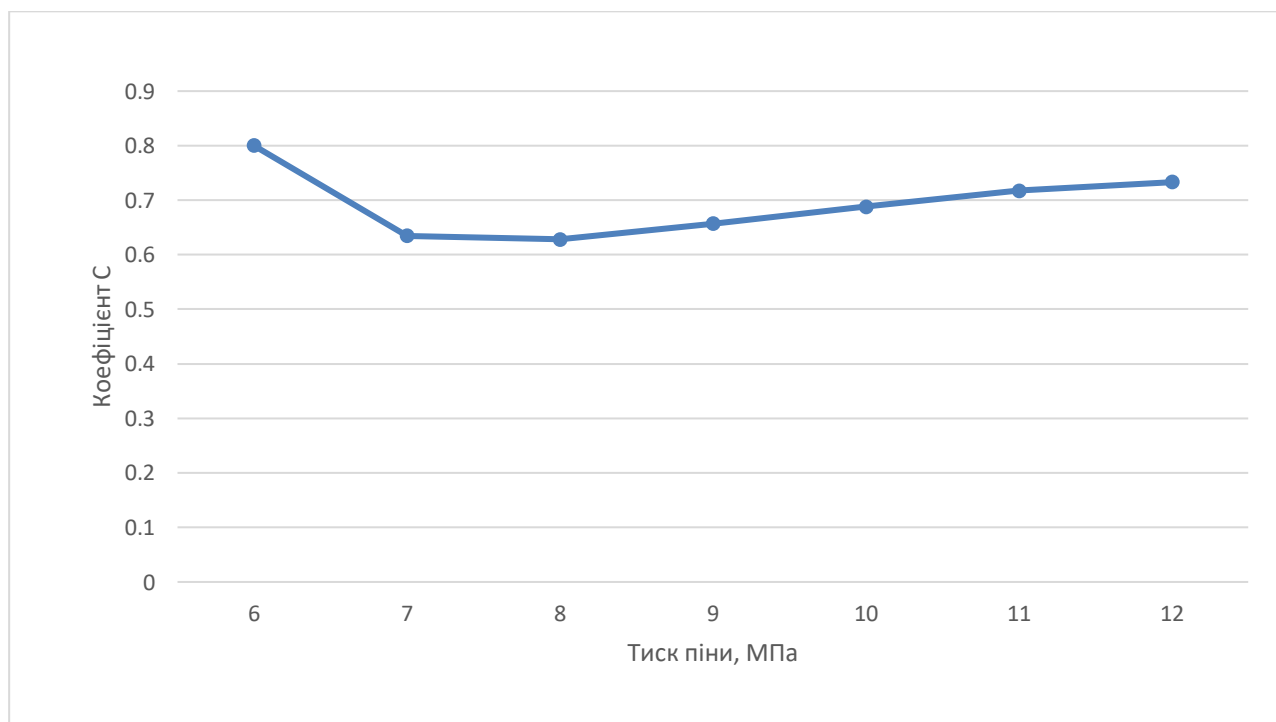


Рисунок 2.25 – Аналітичні значення я коефіцієнта енергоефективності при витраті рідини $0,015 \text{ м}^3/\text{с}$

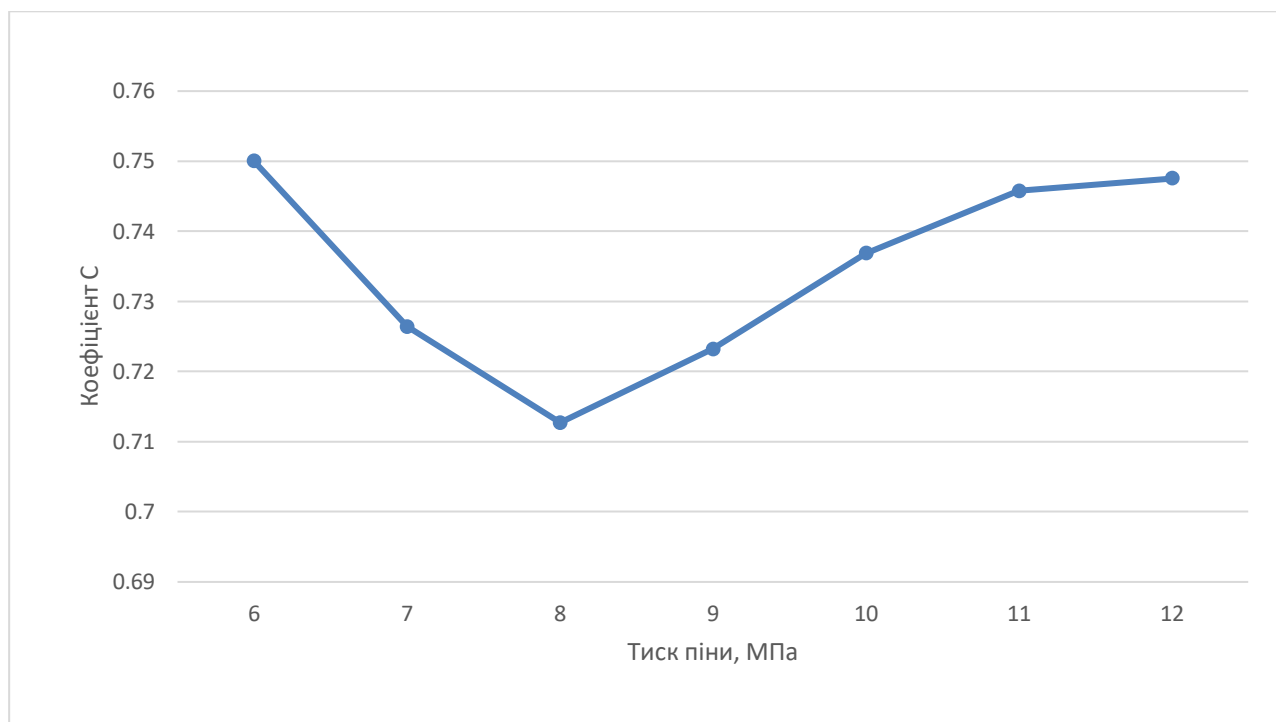


Рисунок 2.26 – Аналітичні значення коефіцієнта енергоефективності при витраті рідини $0,02 \text{ м}^3/\text{с}$

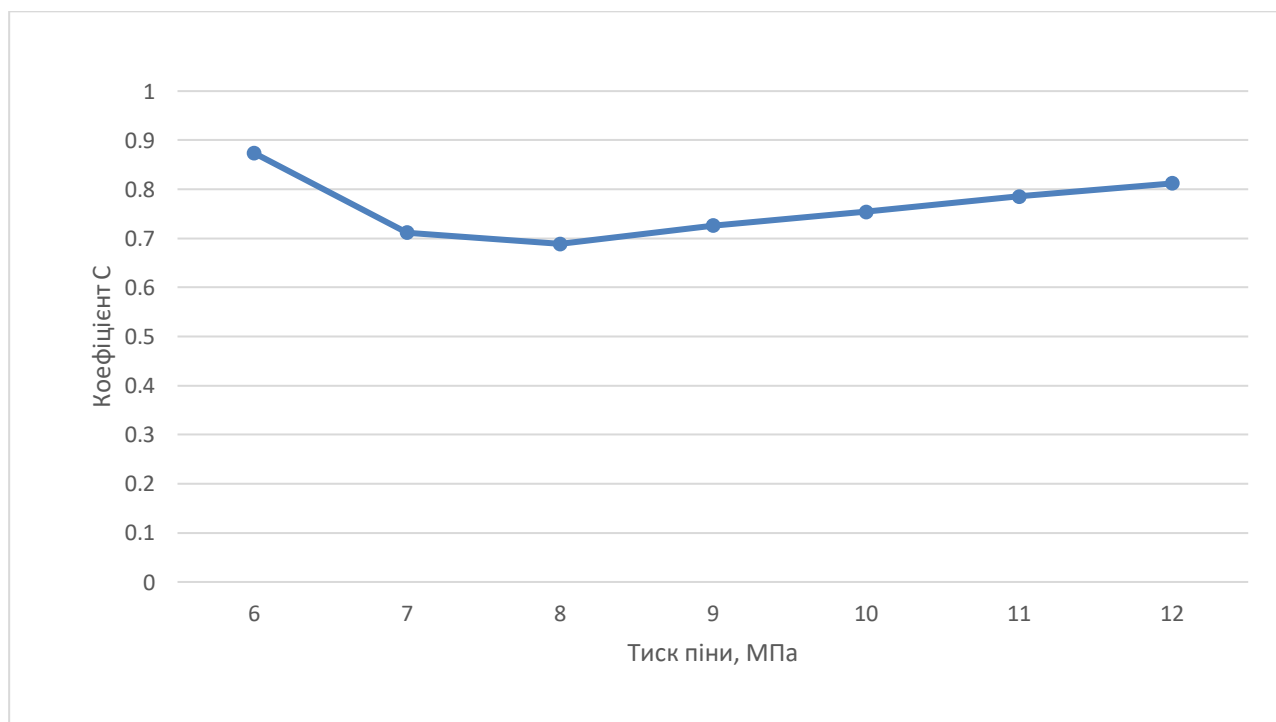


Рисунок 2.27 – Аналітичні значення коефіцієнта енергоефективності при витраті рідини $0,025 \text{ м}^3/\text{с}$

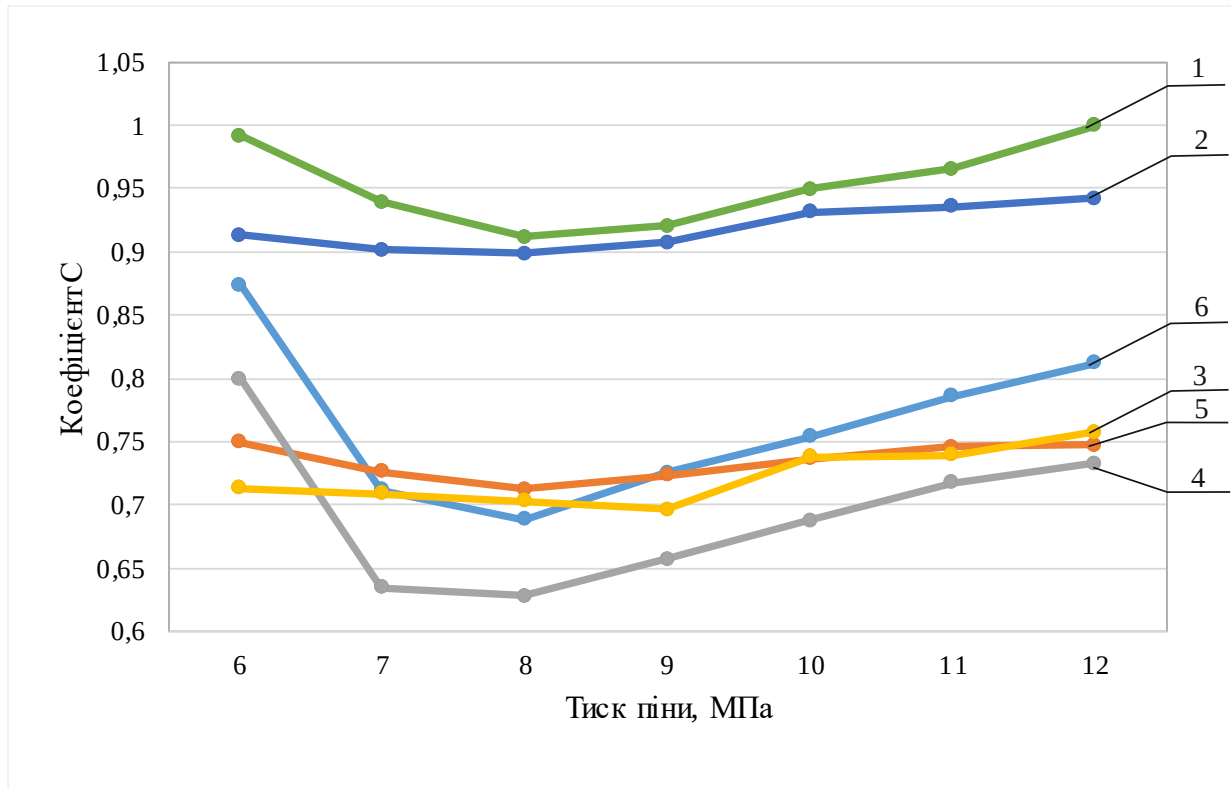


Рисунок 2.28 – Аналітичні значення коефіцієнта енергоефективності при різних витратах рідини:

1 – 0,001 м³/с; 2 – 0,005 м³/с; 3 – 0,01 м³/с; 4 – 0,015 м³/с; 5 – 0,02 м³/с;
6 – 0,025 м³/с

Отримані результати підтверджують енергоефективність піногенератора.

Найменший коефіцієнт енергоефективності спостерігається при витраті рідини 0,015 м³/с (при тиску піни 7, 8, 9 МПа) і коливається в межах від 0,628 до 0,657. При збільшенні витрати рідини коефіцієнт енергоефективності зростає і при витраті рідини 0,025 м³/с коливається в межах від 0,69 до 0,87 (найбільше значення тиску піни 6 МПа). При зменшенні витрати рідини (менше 0,015 м³/с) коефіцієнт енергоефективності зростає. Згідно проведених досліджень найефективнішим режимом роботи піногенератора є робота при витраті рідини 0,001 м³/с, при цьому коефіцієнт енергоефективності коливається в межах від 0,91 до 1, найбільше значення набуває при тисках піни 6 і 12 МПа [108].

2.4 Висновки до розділу 2

1. Проведене аналітичне дослідження процесів змішування потоків у камері змішування пристрою ежекційного типу дозволило виявити ключові закономірності, що визначають ефективність роботи системи. Аналіз геометричних параметрів камери змішування, а також залежностей витрати повітря від тиску та витрати рідини, показав, що на ефективність процесу значно впливають співвідношення між параметрами подачі повітря і рідини, а також конструктивні особливості сопел і камери змішування.

2. Встановлено, що витрата повітря зростає пропорційно до збільшення тиску його подачі, а витрата рідини визначає характер розподілу потоку в камері. Наявність «відриву» кривих на низьких значеннях тиску повітря (0,2 МПа) свідчить про складну взаємодію потоків у певних режимах роботи, що відкриває перспективи для подальшого комп'ютерного моделювання, вивчення процесу і вдосконалення конструктивних параметрів системи.

3. Математичні залежності підтвердили, що довжина камери змішування є критичним параметром для досягнення раціонального коефіцієнта корисної дії (ККД) системи. Вибір раціональної, ефективної довжини початкової та основної ділянок камери змішування дозволяє суттєво покращити показники змішування потоків, забезпечуючи рівномірний розподіл тиску і зменшуючи втрати енергії.

4. Результати розрахунків у програмному середовищі «Maple 9,5» продемонстрували, що тиск піни на виході з камери змішування залежить від геометрії пристрою, робочих режимів насоса та діаметра сопел. Це підтверджує важливість інтеграції чисельних методів моделювання для прогнозування параметрів роботи системи на етапі її проєктування.

5. У даній роботі проведено теоретичне моделювання процесів, залежностей тиску повітря, що відбуваються в піногенераторах, за допомогою програмного комплексу FlowSimulation (SolidWorks). На основі отриманих

результатів було визначено коефіцієнти енергоефективності при різних режимах роботи, що дозволило ідентифікувати найбільш раціональні параметри експлуатації і енергоефективності режимів роботи пристроїв циркуляційної системи бурової установки. Зокрема, досліджено діапазони тиску від 6 до 12 МПа та витрати рідини від 0,001 до 0,025 м³/с. Встановлено, що найефективнішим режимом роботи піногенератора є робота при витраті рідини 0,001 м³/с, при цьому коефіцієнт енергоефективності коливається в межах від 0,91 до 1, найбільше значення набуває при тисках піни 6 і 12 МПа, що є раціональним з погляду співвідношення енергоспоживання до продуктивності.

Ці дані мають практичну цінність для розробки нових енергозберігаючих рішень та модернізації існуючих установок очищення, сприяючи підвищенню загальної ефективності виробничих процесів.

Отримані результати відкривають нові можливості для оптимізації робочих характеристик пристроїв ежекційного типу, методом комп'ютерного моделювання, проведенням експериментального дослідження і в разі підтвердження верифікації теоретичних і експериментальних даних, проведення промислового, випробувального дослідження модернізованого, удосконаленого піногенератора. Удосконалення конструктивних і режимних параметрів дозволить підвищити ефективність їх використання у бурових установках, знизити енергетичні витрати, а також забезпечити високий рівень екологічної безпеки за рахунок точного прогнозування параметрів двофазного потоку на виході.

РОЗДІЛ 3

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ ПІНОУТВОРЕННЯ П'ЯТИСОПЛОВИМ ПІНОГЕНЕРАТОРОМ МЕТОДОМ КОМП'ЮТЕРНОГО МОДЕЛЮВАННЯ

Дослідження процесу буріння нафтових і газових свердловин показало, що обсяги робіт зі свердловинами, які мають аномально низькі пластові тиски, з кожним роком зростають. Це обумовлено низкою серйозних проблем, серед яких значне поглинання бурового розчину, ймовірність закупорювання продуктивного пласта буровим розчином і недосягнення очікуваного результату. Уникнути таких ускладнень можливо завдяки застосуванню газорідинних сумішей як бурового розчину. Вони мають помітні переваги над традиційними промивальними рідинами та дозволяють усунути зазначені негативні явища. Під час розкриття продуктивних горизонтів за умов низьких коефіцієнтів аномальності для промивання свердловин рекомендується використовувати піни. [13, 14]. З'ясовано, що в поточній практиці буріння нафтових і газових свердловин із застосуванням піни немає обладнання, здатного забезпечити утворення піни з конкретно заданими структурою та дисперсністю. Розглядається застосування вдосконаленого піногенератора для отримання піни. У дослідженні процесу піноутворення використано метод комп'ютерного моделювання, який дозволив детально проаналізувати процеси, що відбуваються шляхом взаємодії струменів рідини, газу та їх пінистого розчину в межах ежекційного пристрою циркуляційної системи бурової установки. Зокрема, було вивчено розподіл тиску та швидкості в поздовжньому розрізі піно генеруючого пристрою за умов зміни граничних параметрів, а саме при різних значеннях підведення тиску до піногенератора (10 і 7,5 МПа). [104].

Проведення комп'ютерних досліджень проводяться на основі попередніх аналітично, математичних досліджень, можливість використання вдосконаленої конструкції ежекційного пристрою для підвищення ефективності роботи

пристроїв циркуляційної системи з ріціональними, ефективними режимами роботи. Отримані результати слугують фундаментом для створення піногенераторів, а також для реалізації експериментальних і промислових досліджень та випробувань [104].

3.1 Підвищення ефективності використання пінистих систем у процесах буріння нафтогазових свердловин

Процес буріння нафтогазових свердловин у пористих і нестійких породах супроводжується численними технічними труднощами, які мають вагомий вплив на ефективність виконання робіт. Серед основних проблем варто виділити такі аспекти:

- інтенсивне поглинання бурового розчину, що іноді досягає катастрофічних масштабів. Це зумовлює значне зростання витрат на закупівлю хімічних реагентів, підготовку промивальних рідин, спуск проміжних колон, здійснення тампонажних робіт та інші пов'язані заходи;
- руйнування нестійких порід під впливом бурового розчину, що ускладнює отримання якісного керна, необхідного для проведення геологічних досліджень та аналізу;
- виникнення ускладнень у процесі буріння, таких як розмивання стінок свердловини, утворення каверн, накопичення шламових відкладень на забої, прихоплення та заклинювання бурового інструменту;
- можливість закупорювання продуктивного пласта буровим розчином під час розкриття нафтогазоносних горизонтів, що може призводити до недосягнення очікуваних результатів у видобутку вуглеводнів.

Ці проблеми вимагають ретельного інженерного підходу та застосування відповідних технологій для забезпечення стабільності процесу буріння й максимізації ефективності розвідки та видобутку природних ресурсів.

Уникнути зазначених ускладнень можна завдяки застосуванню газорідинних сумішей як бурового розчину. Вони мають значні переваги над традиційними промивальними рідинами, дозволяючи ефективно усунути наведені негативні явища.

Під час освоєння продуктивних горизонтів з коефіцієнтом аномальності меншим за 1,0 для промивки слід застосовувати насичені повітрям рідини з додаванням поверхнево-активних речовин (ПАР). У випадку ще нижчих коефіцієнтів аномальності доцільно застосовувати піни або газоподібні агенти [43].

У нафтогазовій промисловості найбільш широко застосовуються аеровані рідини і піни, які демонструють суттєві переваги порівняно з традиційними буровими розчинами. Використання піни для промивання вибою під час буріння сприяє значному збільшенню механічної швидкості проходки в твердих породах, досягнувши показника приблизно в чотири рази більшого за ефективність бурових розчинів. Крім того, цей метод дозволяє уникнути поглинання в пористих та тріщинуватих породах, а також запобігає кольматації проникних пластів.

При проведенні робіт з розкриття та освоєння продуктивних горизонтів використання пінних технологій підвищує продуктивність свердловини в 1,5–2 рази, що супроводжується значним скороченням термінів освоєння родовищ, які зменшуються приблизно у 4–5 разів. Це робить застосування аерованих рідин і пін перспективним напрямом у галузі буріння і розробки родовищ.

Процес утворення піни є досить складним, оскільки на її якість впливають різноманітні фізико-хімічні, фізико-технічні та інші чинники. Зазвичай для створення піни застосовують піногенератори, які відрізняються за конструкцією та принципом дії. Проте наразі у сфері буріння нафтогазових свердловин із використанням піни немає обладнання, здатного забезпечити формування піни з конкретно заданими структурними параметрами та дисперсністю.

Це підкреслює важливість даної проблеми та потребу у проведенні додаткових наукових досліджень, спрямованих на вдосконалення ефективності пінних систем під час буріння з застосуванням пінистих розчинів.

3.2 Обґрунтування і постановка завдань комп'ютерного моделювання досліджень

Результати дослідження процесу будівництва нафтогазових свердловин свідчать про поступове зростання кількості бурінь у пластах з аномально низьким тиском. З метою дослідження геологічної будови перспективних територій Західної України було проведено буріння пошуково-розвідувальних свердловин на площах Коломийській, Гуцулівській, Дебеславецькій та Старобогородчанській. Дослідження складнощів, що виникають у процесі буріння [43], виявило, що головні проблеми стосуються нестабільності порід у верхній непродуктивній частині розрізу, а також низьких пластових тисків. Це стає причиною обвалення стінок свердловин, утворення каверн, водопровів, поглинань промивної рідини та прихоплення інструменту через перепади тиску. Наявні умови освоєння нафтогазових покладів свідчать про необхідність використання промивної рідини зі зниженою густиною для забезпечення стабільності процесу. Даний тип рідини може бути отриманий за допомогою аерації, яка дозволяє регулювати густину промивальної субстанції в значному діапазоні. Таке налаштування густини забезпечує можливість контролю рівня гідростатичного тиску на вибій: його можна як збільшувати, так і зменшувати залежно від потреби. У процесі освоєння продуктивних горизонтів із коефіцієнтом аномальності менше 1,0 рекомендується використовувати аеровані рідини, що містять добавки поверхнево-активних речовин (ПАР). У випадках, коли коефіцієнт аномальності є особливо низьким, доцільно застосовувати піни або газоподібні агенти для забезпечення ефективного промивання.

Застосування піни в якості промивальної рідини під час первинного розкривання пластів забезпечує мінімізацію кольматації. Крім того, використання піни сприяє зменшенню поглинання фільтрату промивальної рідини. Одним з популярних способів формування пінистого розчину є метод розпорошування, що базується на активному змішуванні піногенеруючих струменів рідини з повітрям. Зокрема, він реалізується через ежектування повітря струменем рідини за допомогою піногенеруючих ежекторних пристроїв. Для вивчення процесу піногенерації за допомогою односоплового ежектора була створена тривимірна модель пристрою у програмному середовищі SolidWorks. Проте, при подачі великих об'ємів піни до свердловини односоплові піногенеруючі пристрої демонструють низьку ефективність, оскільки змішування рідини з повітрям відбувається неналежним чином, що спричиняє утворення недостатньо якісної дисперсної піни.

З метою вдосконалення технології, на основі структурного аналізу було запропоновано схему п'ятисоплового піногенератора та розроблено багатосоплові пристрої раціональної конструкції з оптимальними геометричними параметрами. Розробка здійснювалася з урахуванням результатів комп'ютерного моделювання для забезпечення підвищеної ефективності піноутворення. Однак, недоліком існуючої конструкції залишається недостатня ефективність насичення рідини повітрям через малу площу контакту у вставці ежектора, що ускладнює якісне змішування в'язкої промивальної рідини з повітрям на ранніх етапах процесу.

У літературних джерелах висвітлюються рекомендації щодо використання поверхнево-активних речовин (ПАР) для роботи в пластах з аномально низькими пластовими тисками. Проте ці рекомендації не охоплюють застосування ПАР для створення пінної суміші. Удосконалена конструкція піногенератора, розроблена для підвищення ефективності процесу піноутворення, забезпечує значне поліпшення властивостей пінної суміші на виході без зміни вхідного тиску чи витрат рідини і повітря. Інноваційний

змішувач рідини і повітря виконаний таким чином, що дозволяє їх одночасне подавання в камеру попереднього змішування. У ній формуються області інтенсивної турбулентності, що сприяє покращенню процесу змішування.

Незважаючи на заявлені переваги нової конструкції, технологічні рішення для підтвердження цих характеристик залишаються недостатньо опрацьованими. У зв'язку з цим поставлено задачу провести комп'ютерні дослідження вдосконаленої конструкції піногенератора та здійснити порівняння її ефективності з аналогічною конструкцією для визначення переваг, що дозволить удосконалити процес піноутворення та підвищити його якість.

3.3 Мета та задачі комп'ютерного моделювання досліджень

Метою комп'ютерного моделювання досліджень є розробка концептуальних рішень для технології утворення піни із використанням піногенератора у насосно-циркуляційних системах бурових установок в умовах видобування важких вуглеводнів. Це сприятиме підвищенню ефективності роботи таких систем під час промивання свердловин піною [104].

Для реалізації цієї мети виконувалися наступні завдання:

- проведення моделювальних досліджень за умов тиску рідини 10 МПа на вході до підвідного патрубку піногенератора [104];
- виконання моделювання досліджень при подачі потоку рідини під тиском на початку підвідного патрубку піногенератора 7,5 МПа [104].

3.4 Матеріали та методи комп'ютерного моделювання досліджень

Аналіз існуючих експлуатаційних рішень для конструкцій піногенеруючих пристроїв, що використовуються під час буріння і освоєння

нафтових та газових свердловин, дозволяє ефективніше оптимізувати та більш обґрунтовано проєктувати конструкцію піногенератора. Це сприяє досягненню максимальної якості процесу піноутворення при бурінні свердловин глибиною до 5000 метрів. У цьому контексті найбільш ефективним виявився багатосопловий піногенератор моделі ПГП-100х25-5.

Таблиця 3.1[104] Техніко-експлуатаційні характеристики піногенератора ПГП-100х25-5

№п/п	Параметр	Дані
1	Максимальний робочий тиск, МПа	25
2	Тиск рідини на вході, МПа	7,5, 10, 12
3	Максимальний розрахунковий тиск на виході, МПа	19–20,5
4	Коефіцієнт ежекції від	1,08
5	Геометричні параметри, мм:	
	– довжина;	400
	– діаметр;	100

Удосконалений модернізований піногенератор складається з корпусу циліндричної форми (1), всередині якого розташовано змішувач рідини та повітря (2) з ущільнювальними кільцями (3), втулками (4) із камерами попереднього змішування, каналом для підведення повітря (5), розпірними кільцями (6) з індивідуальними паралельно встановленими дифузорами, притискними кільцями (7), завихрювачем пінистого розчину (8) з напрямними лопатками, а також загальним дифузорею (9) з камерою турбулентного змішування. У змішувачі рідини та повітря передбачено вертикальні отвори для подачі рідини (10) та горизонтальні отвори (11), які з'єднані з вертикальними каналами для подачі повітря (12) [104].

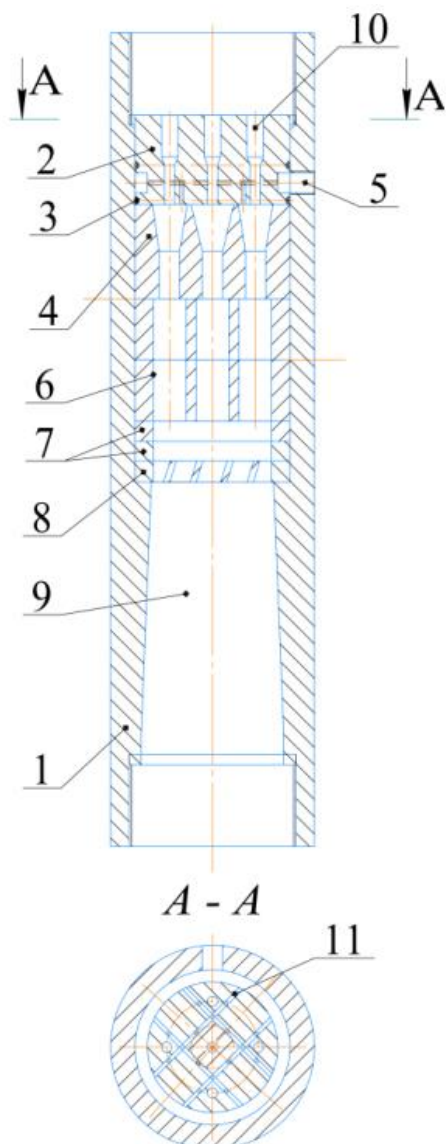


Рисунок 3.1 – Удосконалений піногенератор ПГП-100x25-5:

1 – корпус; 2 – змішувач рідини і повітря; 3 – ущільнювальні кільця; 4 – втулка; 5 – канал для підведення повітря; 6 – розпирні кільця; 7 – притискні кільця; 8 – завихрювач пінної суміші; 9 – загальний дифузор; 10 – вертикальні отвори для подачі рідини; 11 – горизонтальні отвори для подачі повітря; 12 – вертикальні отвори для подачі повітря.

Піногенератор, слугує для збагачування рідини повітрям, де в процесі створюється пінистий розчин, функціонує таким чином. Рідина надходить у корпус (1) піногенератор, проходить отвори (10) змішувача рідини та повітря (2) потрапляє до камер попереднього змішування (4). Одночасно до змішувача

подається стиснене повітря через канал (5) у корпусі (1), а також через отвори (11) і (12) змішувача рідини та повітря (2) [104].

Із змішувача повітря надходить до камер попереднього змішування (4), де формується зона інтенсивної турбулентності у робочій частині змішувача. У зазначених камерах завдяки розпірним кільцям (6) та притискним кільцям (7) відбувається інтенсивна турбулізація потоків, змішування повітря з рідиною та формування пінистого розчину. Після цього сформована піниста рідина надходить в завихрювач пінної суміші (8), що забезпечує додаткове якісне змішування та формування піни в камері змішування, розташованій у дифузорі (9). У дифузорі рідина рухається у турбулентному режимі, що сприяє закріпленню процесу насичення рідини повітрям і стабілізації піноутворення [104].

Для дослідження процесу піноутворення було проведено моделювальні дослідження, оскільки їх використання дозволяє більш детально проаналізувати перебіг процесів руху потоків рідини, газу та газорідинної суміші уздовж піногенератора порівняно з експериментальними методами. У дослідженнях застосовано програму FlowSimulation (США) — прикладний модуль SolidWorks, який забезпечує можливість варіювання вхідних параметрів рідини та повітря в широкому діапазоні й отримання об'єктивної інформації про необхідні параметри у будь-якій точці піногенератора. У зазначеному програмному середовищі чисельне розв'язання задач здійснюється методом скінченних об'ємів із використанням нестационарних рівнянь Нав'є–Стокса та рівнянь теплопередачі. Дискретизацію рівнянь реалізовано у консервативній формі: часткові похідні апроксимуються із другим порядком точності, а часові похідні — за неявною схемою Ейлера першого порядку [104].

Таблиця 3.2 [104] Початкові умови проведення комп'ютерного моделювання досліджень

Термодинамічні параметри	Статичний тиск: 101325.00 Па Температура: 293.20 К
Параметри швидкості	Вектор швидкості: – швидкість у напрямку X: 0 м/с; – швидкість у напрямку Y: –9.810 м/с; – швидкість у напрямку Z: 0 м/с
Параметри турбулентності	Інтенсивність та масштаб турбулентності: – інтенсивність: 2.00 %; – довжина: 0.001 м
Термодинамічні параметри	Повний тиск 1.60e+07 Па Тип температури: температура вихідних компонентів Температура: 293.20 К
Параметри турбулентності	Інтенсивність та масштаб турбулентності: – інтенсивність: 2.00 %; – довжина: 0.001 м
Параметри прикордонного шару	Тип прикордонного шару: турбулентний

Таблиця 3.3 [104]

Тиск навколишнього середовища

Тип	Тиск навколишнього середовища
Система координат	Координатна система, прив'язана до поверхні
Базова вісь	X
Термодинамічні параметри	Тиск довкілля: 101325.00 Па Тип температури: температура вихідних компонентів Температура: 293.20 К
Параметри турбулентності	Інтенсивність та масштаб турбулентності: – інтенсивність: 2.00 %; – довжина: 0.001 м
Параметри прикордонного шару	Тип кінцевого шару: турбулентний

Таблиця 3.4 [104]

Min/Max значення

Ім'я	Мінімум	Максимум
Тиск [Па]	22464.47	1.63e+07
Щільність (текуче середовище) [кг/м ³]	0.31	192.21
Швидкість [м/с]	0	522.189
Швидкість (X) [м/с]	-219.739	211.135
Швидкість (Y) [м/с]	-157.952	159.655
Швидкість (Z) [м/с]	-522.027	130.490
Температура [K]	154.54	318.00
Температура (текуче середовище) [K]	154.54	318.00
Завихренність [1/с]	1.23	135997.27
Швидкість у системі координат, що обертається [м/с]	0	522.189
Швидкість у системі координат, що обертається (X) [м/с]	-219.739	211.135
Швидкість у системі координат, що обертається (Y) [м/с]	-157.952	159.655
Швидкість у системі координат, що обертається (Z) [м/с]	-522.027	130.490
Число Маха []	0	2.10
Стосовна напруга [Па]	0	18231.65
Відносний тиск [Па]	-78860.53	1.62e+07
Індикатор неколінеарності теплового потоку []	1.5477947e-15	1.0000000
Індикатор теплового опору []	5.1055861e-16	1.0000000
Коефіцієнт тепловіддачі [Вт/м ² /K]	0	0
Щільність теплового конвективного потоку в локальній системі	-1.522e+08	4.903e+08

координат [Вт/м ²]		
Поверхнева густина теплового потоку [Вт/м ²]	0	0
Поверхнева густина теплового потоку (конвекція) [Вт/м ²]	0	0
Діаметр частинок [м]	9.996e-05	1.000e-04
Маса частинок [кг]	5.226e-10	5.226e-10
Відносна швидкість частинок [м/с]	0.095	601.240
Щільність матеріалу частинок [кг/м ³]	998.15	999.22
Гранична довжина траєкторій [м]	0	0.419
Граничний час траєкторій [с]	0	0.023
Швидкість частинок [м/с]	0.464	348.734
Швидкість частинок (X) [м/с]	-6.047	54.710
Швидкість частинок (Y) [м/с]	-105.922	25.113
Швидкість частинок (Z) [м/с]	-348.720	339.152
Температура частинок [K]	286.76	293.20
Траєкторія X [м]	-0.029	0.029
Траєкторія Y [м]	-0.040	0.026
Траєкторія Z [м]	-0.176	0.228
Число Рейнольдса для частинок	51.1676728	66854.5438346
Акустична потужність [Вт/м ³]	0	1549250.198
Рівень акустичної потужності [дБ]	0	181.90

3.5 Результати комп'ютерного моделювання досліджень піногенератора, для визначення раціональних, енергоефективних режимів роботи циркуляційної системи бурової установки

3.5.1 Комп'ютерне моделювання досліджень ефективності роботи модернізованого піногенератора, подача рідини в піногенератор з тиском 10 МПа

У процесі комп'ютерного моделювання роботи модернізованого піногенератора важливою складовою є продовження аналітичних і математичних досліджень. Зокрема, необхідно здійснити верифікацію отриманих аналітичних і теоретичних залежностей, що описують витрату повітря залежно від витрати рідини, а також визначають значення тиску піни на виході з ежекційного піногенератора, досягнення умов утворення піни, при тиску рідини у підвідному патрубку 10 МПа. Визначити раціональні ефективні режими роботи пристроїв циркуляційної системи бурових установок, процесів утворення пінної суміші, враховуючи параметр оцінювання енергоефективності енергій рідини, повітря та піни.

У кінцевій частині камери змішування відбувається стрибок ущільнення, що супроводжується трансформацією повітряно-крапельного потоку на пінистий розчин.

Стрибок ущільнення супроводжується різким зростанням тиску, що виникає за умови, коли швидкість повітряно-крапельного потоку перевищує швидкість звуку у відповідному середовищі. При цьому енергія робочого потоку, яка витрачається на утворення пінистого розчину, збільшується із зменшенням числа Маха, тобто зі скороченням різниці між швидкістю струменів розчину до стрибка ущільнення та швидкістю звуку в цьому потоці. Для визначення швидкості звуку у водоповітряній суміші рекомендується використовувати графік залежності швидкості звуку від об'ємного вмісту повітря у суміші (рис. 3.2) [104].

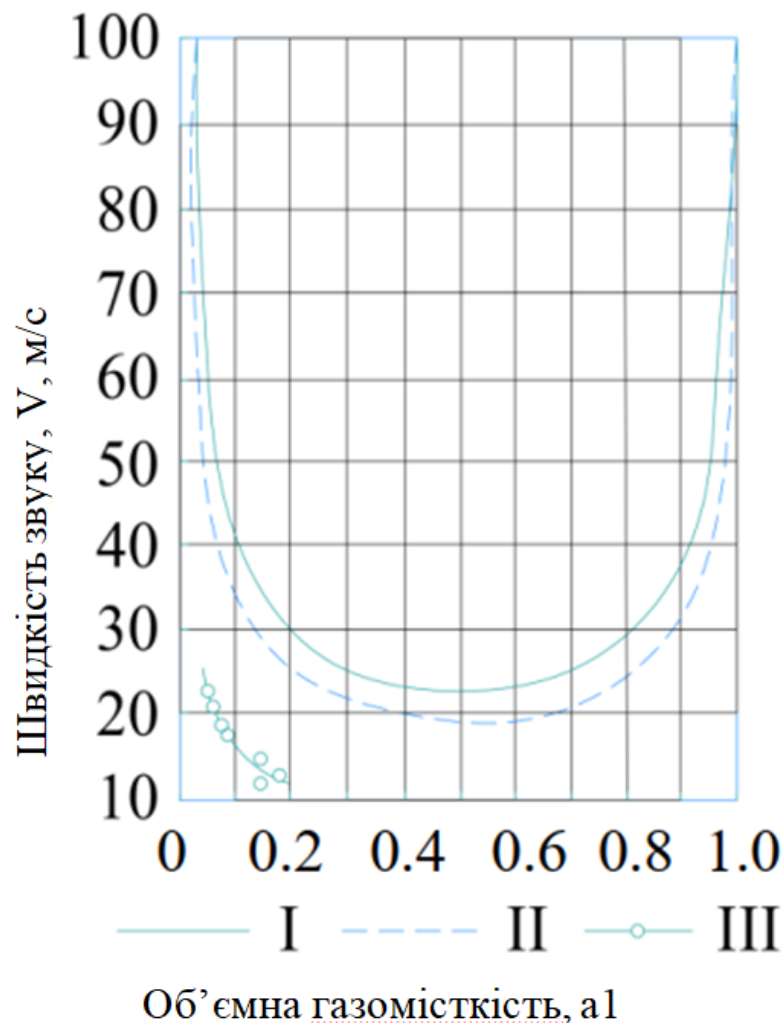


Рисунок 3.2 – Швидкість звуку у водоповітряній суміші:

I – розрахункові значення при адіабатному процесі; II – розрахункові значення при ізотермічному процесі; III – експериментальні значення на дрібнодисперсних сумішах.

Дослідження вхідної частини модернізованого п'ятисоплового піногенератора ПГП-100x25-5 (рис. 3.3) для порівняння роботи камери змішування до та після її удосконалення дослідження проводилися за однакових заданих граничних умов: подача рідини на вході 0,01 м/с, тиск повітря на вході у підвідному патрубку 10 МПа, тиск на виході з пристрою 10 МПа [104].

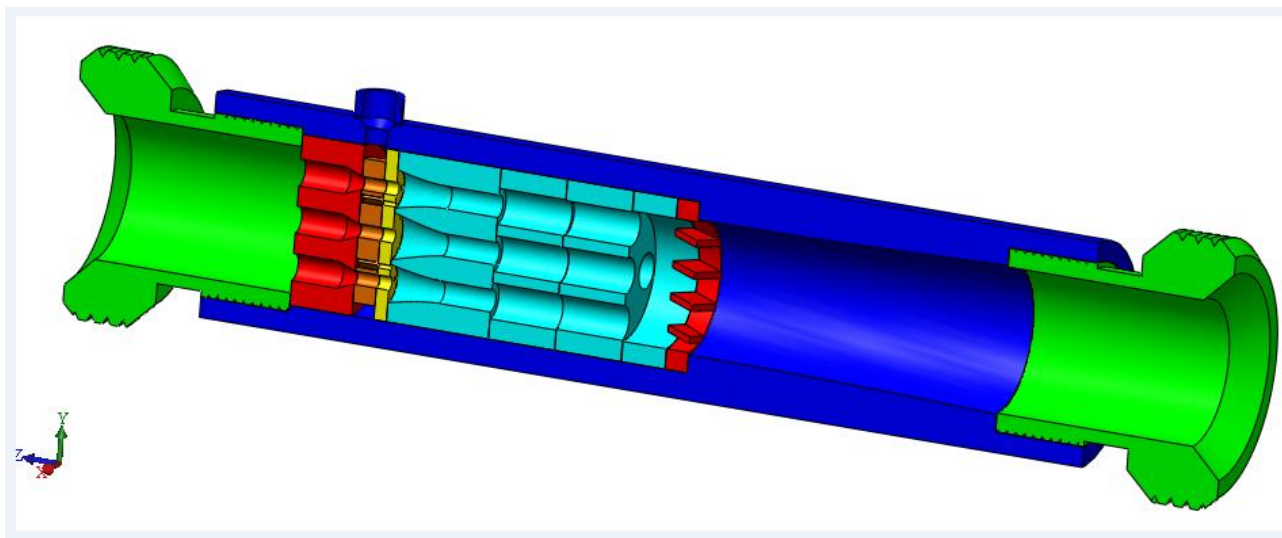
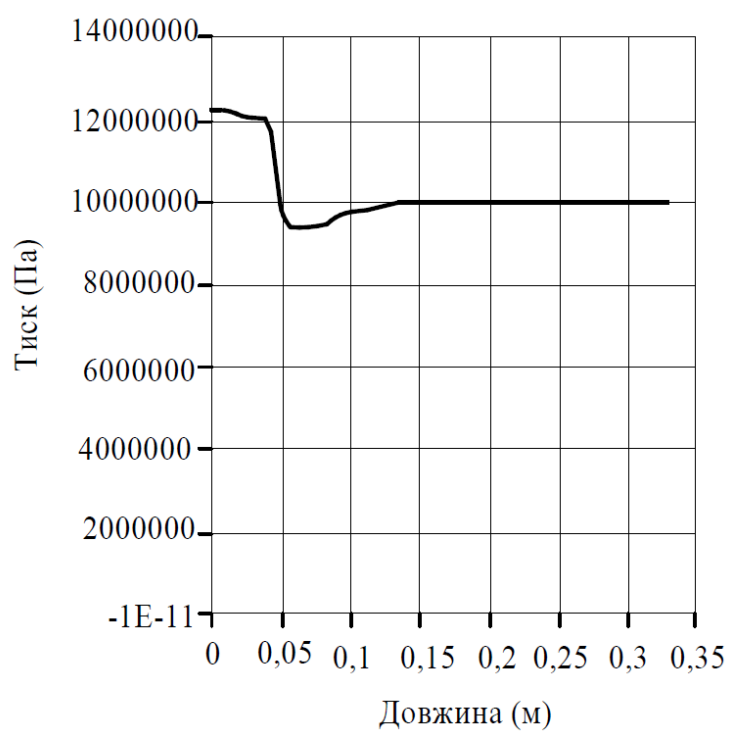
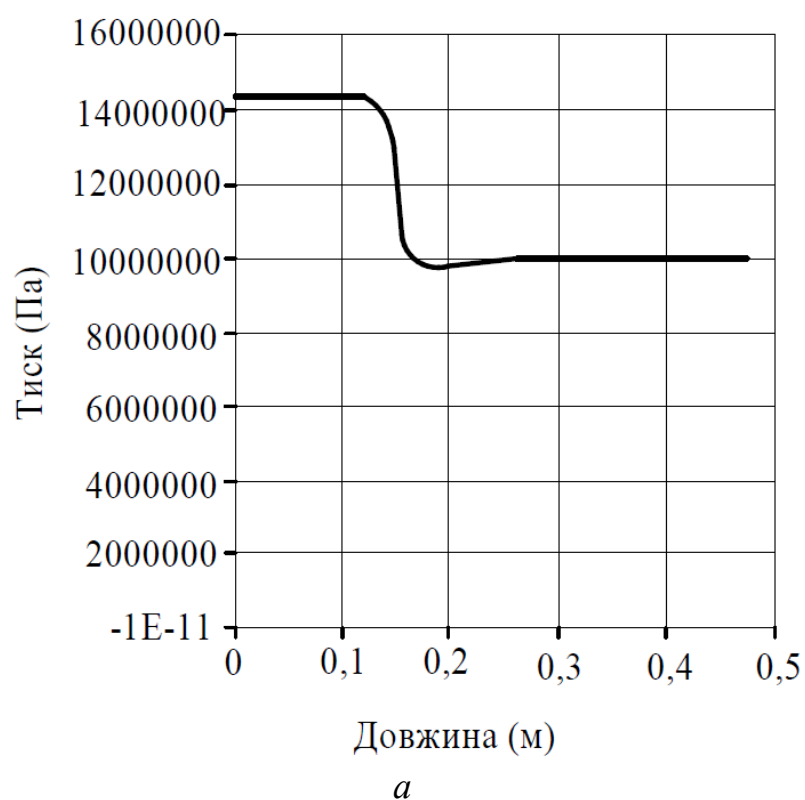


Рисунок 3.3 – Тривимірна модель п'ятисоплового піногенератора раціональної конструкції.

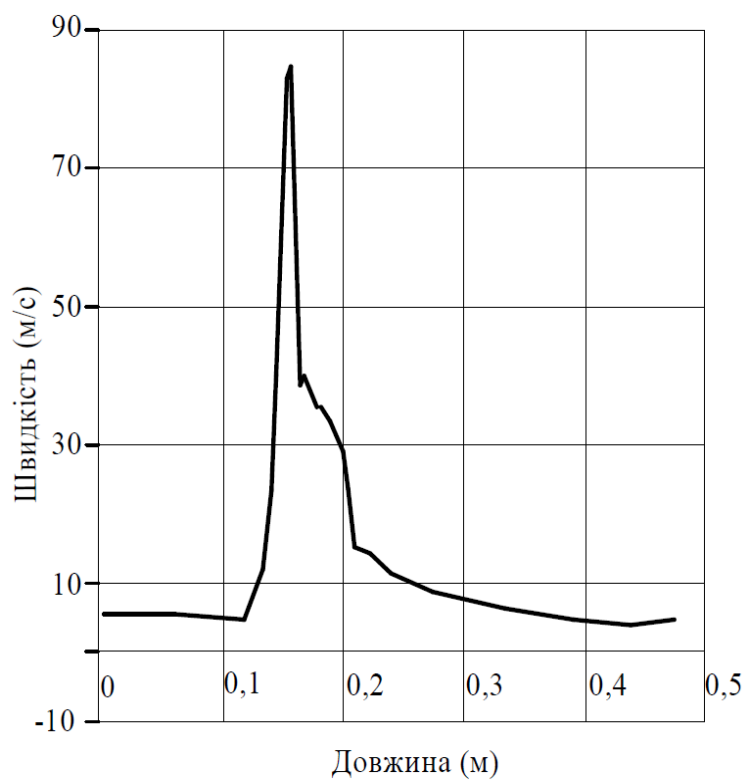
У ході дослідження п'ятисоплового пристрою були застосовані різні варіанти геометричних параметрів його складових для забезпечення роботи у різних режимах. Проводились дослідження при зміні довжини камери змішування, діаметра сопла, при використанні різної форми приймальної частини камери змішування, при різних відстанях між соплом та камерою змішування. Згідно досліджень отримано графічні залежності розподілу тиску й швидкості суміші рідини та повітря в процесі її руху в камері піногенератора до утворення піни (рис. 3.4, 3.5).

Аналіз графічних залежностей (рис. 3.4) розподілу тиску в поздовжньому перерізі піногенератора (подача тиску в підвідний патрубок 10 МПа) демонструє, що завдяки вдосконаленню камери змішування у модернізованого піногенератора є можливість отримання тиску піни на виході 10 МПа, при цьому значно зменшився тиск рідини на вході (з 14 до 12 МПа) (рис. 3.4) [104]. Дане дослідження підтверджує енергоефективність модернізованого піногенератора.

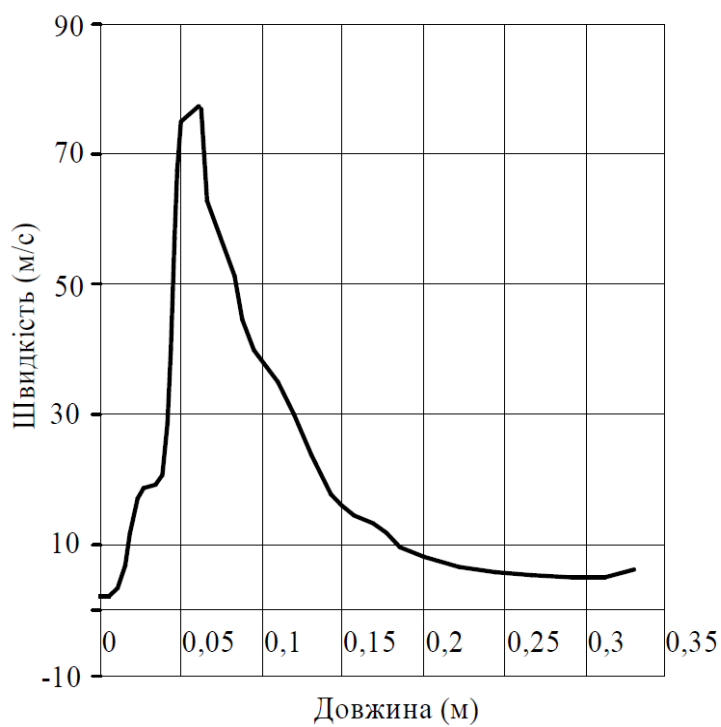


б

Рисунок 3.4 – Залежності розподілу тиску в поздовжньому перерізі піногенератора (подача повітря на вході під тиском 10 МПа): *а* – до вдосконалення; *б* – після вдосконалення конструкції піногенератора



a



б

Рисунок 3.5 – Залежності розподілу швидкості в повздовжньому перерізі піногенератора (при подачі рідини на вході 0,01 м/с): *a* – до вдосконалення; *б* – після вдосконалення конструкції піногенератора [104]

Аналіз графічних залежностей (рис. 3.5) розподілу швидкості у поздовжньому перерізі піногенератора свідчить про те, що максимальна швидкість у цьому перерізі істотно знизилася — з 96 м/с до 80 м/с — і наближається до значення швидкості звуку у водоповітряній суміші. Це дозволяє зменшити довжину камери змішування — з 0,2 м до 0,13 м — у зоні, де відбувається стрибок ущільнення (рис. 3.4) та формується піна [104].

Стрибок ущільнення у модернізованому піногенераторі, як і в його аналогах, виникає при швидкості руху суміші 30 м/с. Ця швидкість забезпечує формування піни з необхідними характеристиками за об'ємної газомісткості від 0,2 до 0,8 (рис. 3.2).

3.5.2 Моделювання дослідження ефективності роботи модернізованого піногенератора при підведенні тиску в підвідний патрубок на вході 7,5 МПа

Для подальших досліджень п'ятисоплового піногенератора змінені граничні умови: подача рідини на вході 0,02 м/с, тиск повітря на вході у підвідному патрубку 7,5 МПа, тиск піни на виході з пристрою 10 МПа [104].

На рис. 3.6 представлено результати моделювання поля тисків у поздовжньому перерізі модернізованого піногенератора, отримані за допомогою модуля Flow Simulation програмного комплексу SolidWorks [104].

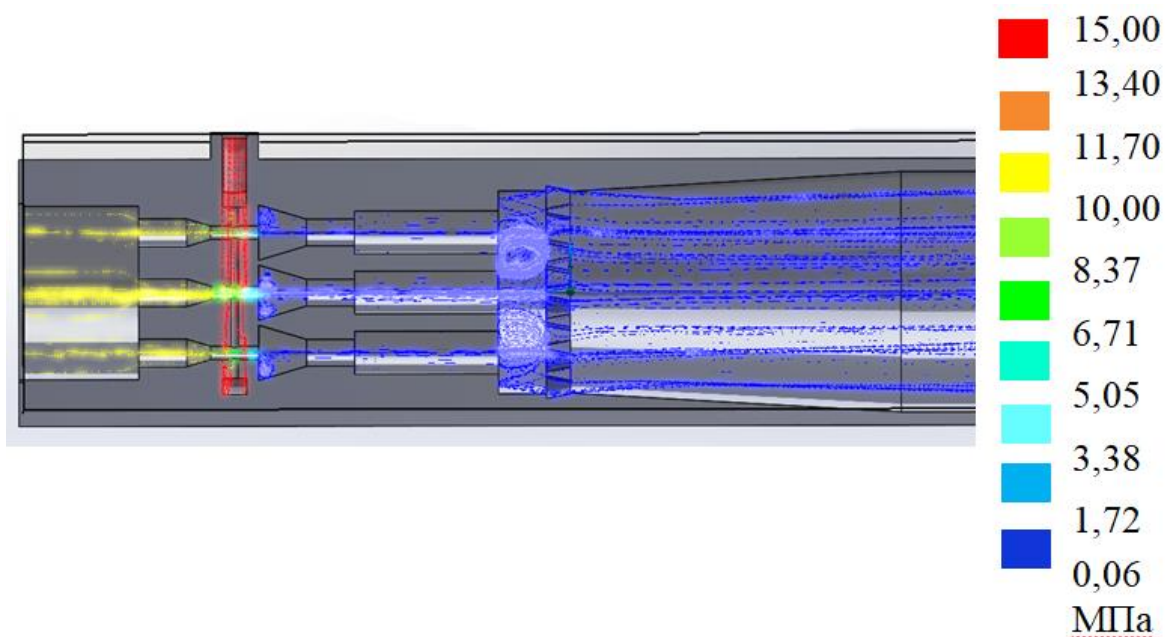


Рисунок 3.6 – Моделювання поля тисків в повздовжньому перерізі піногенератора [104]

На основі моделювання поля тисків були побудовані графічні залежності розподілу тиску у поздовжньому перерізі піногенератора (рис. 3.7). Аналіз отриманих даних показує, що завдяки удосконаленню камери змішування у модернізованому піногенераторі, при зміні граничних умов — а саме зниженні тиску повітря у підвідному патрубку до 7,5 МПа для забезпечення вихідного тиску піни на рівні 10 МПа — та збільшенні подачі рідини на вході до 0,02 м/с, спостерігається істотне зниження тиску рідини на вході (з 27 до 18 МПа). Це, у свою чергу, зумовлює зниження тиску у підвідному патрубку та підтверджує підвищення енергоефективності роботи модернізованого піногенератора [104].

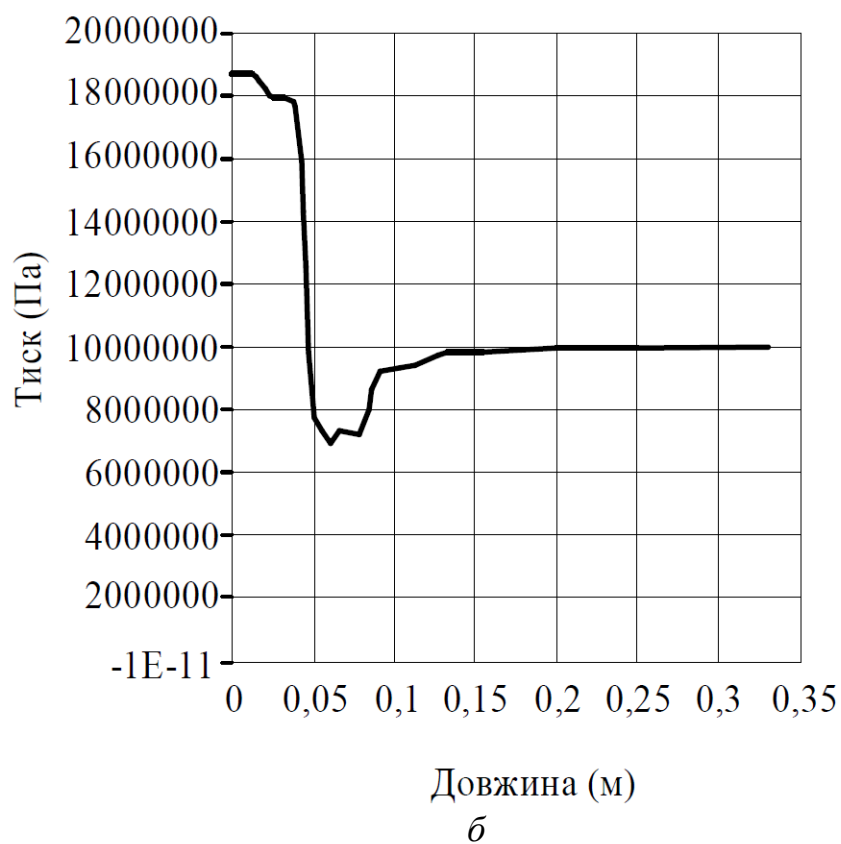
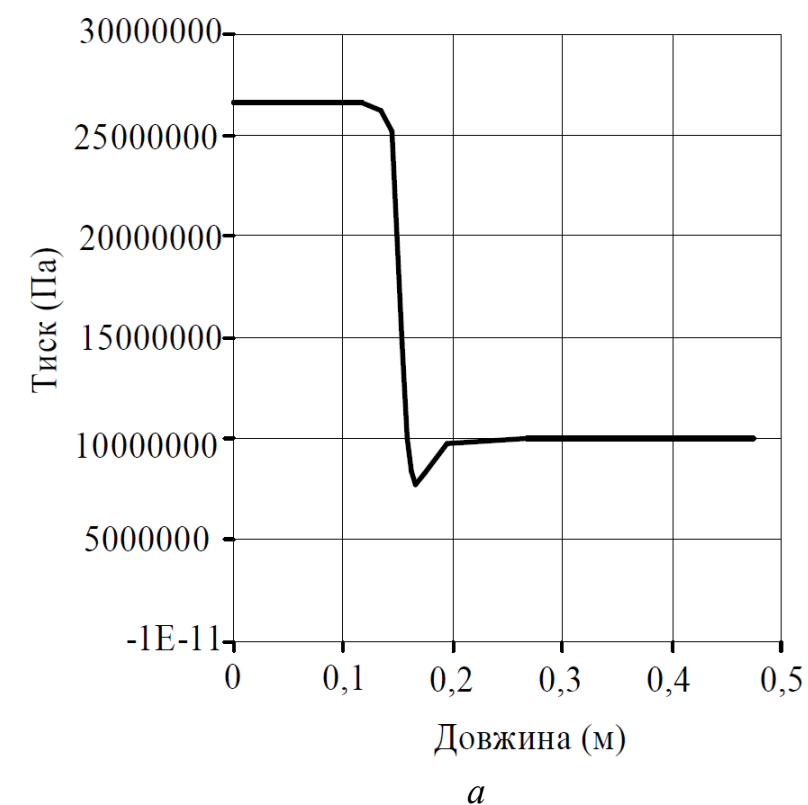


Рисунок 3.7 – Залежність розподілу тиску в поздовжньому перерізі піногенератора (тиск повітря на вході пристрою 7,5 МПа): *a* – до вдосконалення; *б* – після вдосконалення конструкції піногенератора [104]

На рис. 3.8 представлено результати моделювання розподілу поля швидкостей у поздовжньому перерізі модернізованого піногенератора, виконаного за допомогою модуля Flow Simulation програмного комплексу SolidWorks [104].

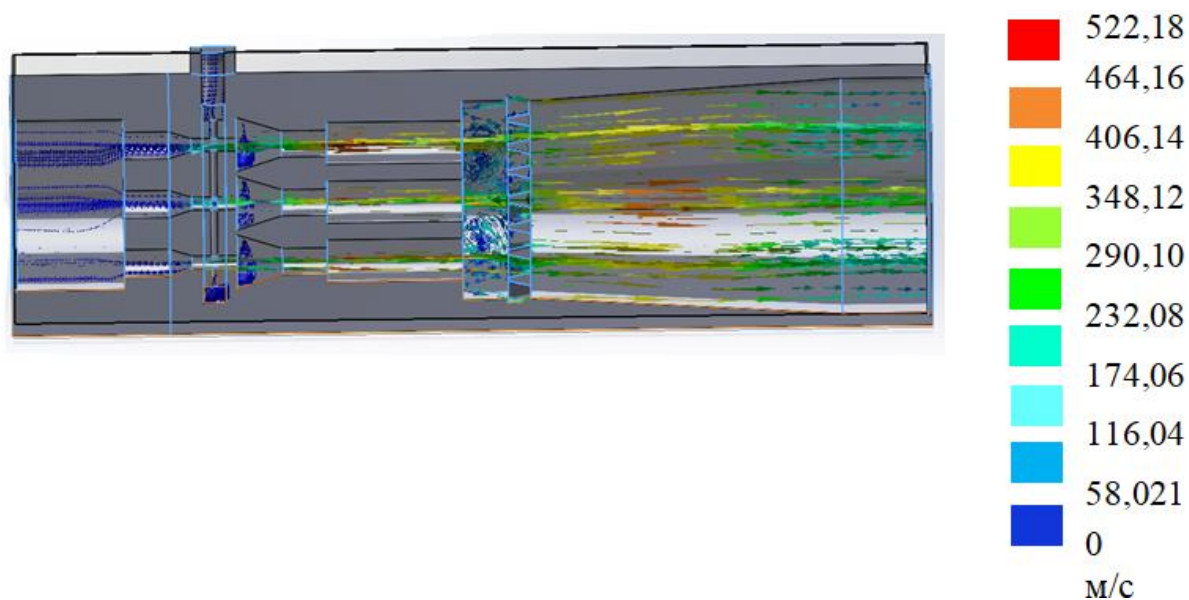


Рисунок 3.8 – Моделювання поля швидкостей в поздовжньому перерізі піногенератора [104]

На основі проведеного моделювання поля швидкостей розроблено графічні залежності розподілу швидкості у поздовжньому перерізі піногенератора (рис. 3.9). Результати аналізу свідчать, що завдяки вдосконаленню камери змішування у модернізованому піногенераторі, під час зміни граничних умов, зокрема зниження тиску повітря в підвідному патрубку до 7,5 МПа, спостерігається істотне зменшення максимальної швидкості у поздовжньому перерізі пристрою (від 177,7 м/с до 159 м/с). Також видно її поступове наближення до швидкості звуку у водоповітряній суміші. Це дозволяє скоротити довжину камери змішування (з 0,2 м до 0,15 м), в яку припадає зона стрибка ущільнення (рис. 3.7), де, відповідно, формуються пінисті структури суміші.

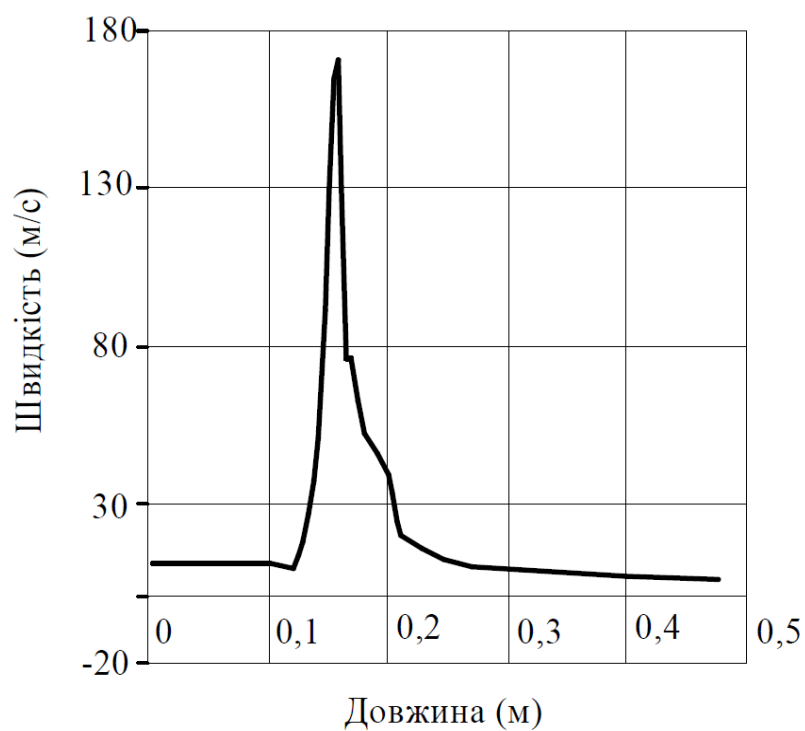
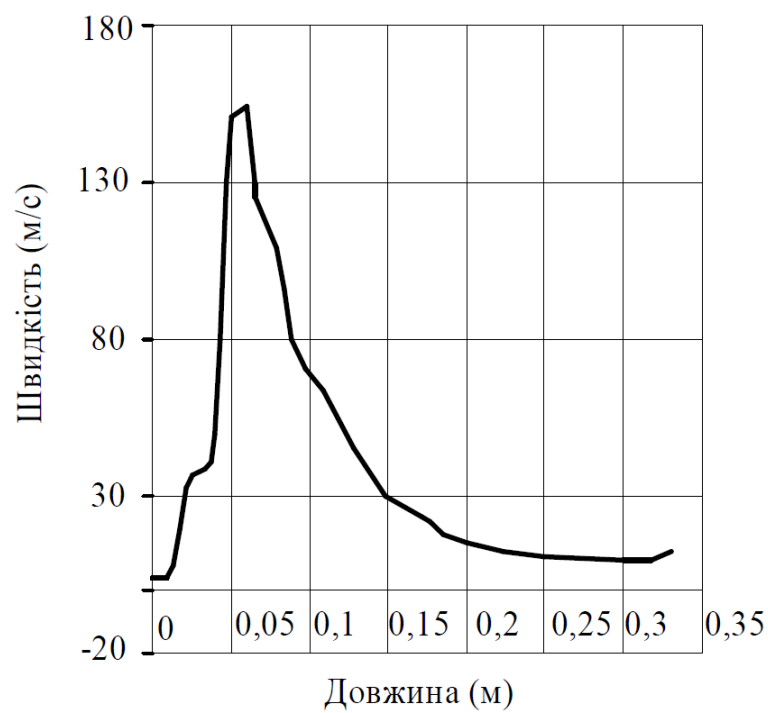
*a**б*

Рисунок 3.9 – Залежності розподілу швидкості в повздовжньому перерізі

піногенератора (при подачі рідини на вході 0,02 м/с): *a* – до вдосконалення; *б* – після вдосконалення конструкції піногенератора [104]

Стрибок ущільнення у модернізованому піногенераторі, так само як і у попередньому дослідженні, відбувається при швидкості 30 м/с, що забезпечує формування піни з необхідними характеристиками за об'ємної газомісткості від 0,2 до 0,8 (рис. 3.2).

Аналізуючи аналітичні залежності розподілу тиску та швидкості у поздовжньому перерізі піногенератора (рис. 3.6–3.9) свідчить про те, що завдяки удосконаленню камери змішування та зміні граничних умов — а саме зниженню тиску у підвідному патрубку до 7,5 МПа за умови забезпечення тиску на виході 10 МПа та збільшення подачі рідини на вході до 0,02 м/с — максимальна швидкість у поздовжньому перерізі пристрою істотно знизилася (з 177,7 м/с до 159 м/с) і наближається до швидкості звуку у водоповітряній суміші. Це дозволяє скоротити довжину камери змішування — з 0,2 м до 0,15 м — у зоні, де формується стрибок ущільнення (рис. 3.6) та відбувається утворення піни. У даному випадку спостерігається також істотне зниження тиску повітря на вході (з 27 до 18 МПа), що зумовлює менший тиск у підвідному патрубку і підтверджує ефективність модернізованої конструкції [104].

3.6 Аналіз результатів комп'ютерного моделювання, процесів утворення піни в модернізованому піногенераторі

У процесі моделювання функціонування п'ятисоплового піногенератора за різних режимів його роботи були побудовані графічні залежності, які відображають необхідний рівень тиску повітря на вході пристрою в залежності від прогнозованого тиску піни на виході, а також заданого тиску рідини на вході. Отримані результати дослідження представлені у вигляді графіків, що демонструють розподіл тиску вздовж поздовжнього перерізу піногенератора

(рисунки 3.4, 3.6) та розподіл швидкості в поздовжньому перерізі пристрою (рисунки 3.5, 3.8). [104].

У рамках дослідження було використано п'ятисопловий піногенератор вдосконаленої конструкції [49], ключовою особливістю якого є наявність камер змішування з конічною приймальною частиною. Особливості конструкції включають варіативність довжини камер змішування, а також циліндричної секції камери змішування, величина якої становила від 1 до 1,5 її діаметра. Конструкція піногенератора передбачає можливість заміни сопел із діаметром у діапазоні 4–8 мм, що забезпечує його високу продуктивність при відповідних умовах експлуатації. Крім того, довжина циліндричної частини сопла була визначена в межах від 1 до 2 його діаметра.

Отримані результати досліджень верифікують покращення та переваги удосконаленої конструкції піногенератора [104]. Зіставлення з аналоговим варіантом [47] свідчить про суттєве зниження тиску повітря на вході (рис. 3.4, а, б, рис. 3.6, а, б), що створює передумови для використання компресорів із меншими параметрами тиску. Водночас у модернізованому піногенераторі фіксується стрибок ущільнення, під час якого повітряно-крапельна суміш переходить у рідинно-бульбашкову форму (рис. 3.4, б, рис. 3.6, б). Це підтверджується аналізом розподілу швидкості у поздовжньому перерізі піногенератора (рис. 3.5, б, рис. 3.8, б), визначено, що швидкість повітряно-крапельного потоку у зоні стрибка ущільнення перевищує швидкість звуку в середовищі суміші. Уздовж руху рідини спостерігаються характерні завихрення потоку (рис. 3.7; рис. 3.9), що вказує на високу ефективність процесу насичення рідини повітрям.

Досягнення зазначених переваг стало можливим завдяки впровадженню у конструкцію модернізованого піногенератора зміненої ежекторної вставки, яка забезпечує інтенсивне перемішування рідини та повітря на початковому етапі змішування, а також завдяки встановленню завихрювача пінної суміші, що сприяє якісному формуванню пінистого розчину у камері змішування. Такі,

проведені дослідження підтверджують ефективність запропонованої конструкції піногенератора.

У процесі експлуатації модернізованого піногенератора важливо враховувати реальні умови та обмеження його використання, зокрема його технічні характеристики (табл. 3.1). Максимальний робочий тиск цього піногенератора становить 25 МПа. На відміну від нього, під час дослідження аналога (рис. 3.6, а) при тиску рідини на вході до підвідного патрубка 7,5 МПа, тиск повітря на вході сягав 27 МПа, що свідчить про неможливість роботи аналога за такими режимами. Модернізований піногенератор, своєю чергою, ефективно функціонує в аналогічних умовах (рис. 3.6, б), оскільки тиск повітря на його вході становить 18 МПа. Для подальших досліджень необхідно дотримуватись ключової вимоги: стрибок ущільнення та, відповідно, формування піни можливі лише за умови, що швидкість повітряно-крапельного потоку у зоні стрибка ущільнення перевищує швидкість звуку в цьому середовищі [104].

Подальші дослідження доцільно спрямувати на розроблення графічних залежностей, які відображатимуть необхідний тиск газу на вході до піногенеруючого пристрою залежно від прогнозованого значення тиску піни на виході за різних витрат і тисків рідини на вході. Отримані аналітичні залежності дають змогу обґрунтовано обирати раціональні режими роботи насосного обладнання та компресорних установок для формування піни із заданими характеристиками. Отримані результати слугуватимуть підґрунтям для подальших експериментальних і промислових досліджень та випробувань піногенераторів.

3.7 Висновки до розділу 3

1. У ході дослідження ефективності роботи вдосконаленої конструкції піногенератора при вхідному тиску рідини в підвідному патрубку 10 МПа було підтверджено його переваги над аналогічними пристроями, що використовуються для формування піни в насосно-циркуляційних системах бурових установок в умовах аномально низьких пластових тисків. Досягнуті результати пояснюються унікальними конструктивними особливостями модернізованого піногенератора. Зокрема, впровадження зміненої ежекторної вставки забезпечує ефективне змішування рідини з повітрям на початковому етапі, а встановлений завихрювач пінної суміші покращує якість формування піни у камері змішування. Однією з ключових переваг удосконаленого пристрою, згідно з результатами досліджень, є можливість досягнення вихідного тиску 10 МПа разом зі зменшенням вхідного тиску повітря з 14 до 12 МПа за умов сталого тиску рідини у підвідному патрубку на рівні 10 МПа. [104].

2. Наступні дослідження удосконаленого піногенератора за тиску рідини на вході у підвідному патрубку 7,5 МПа також свідчать про переваги над існуючими аналогами для технології піноутворення в насосно-циркуляційних системах буріння при аномально низьких пластових тисках. Встановлено, що за таких умов можливе забезпечення вихідного тиску 10 МПа при істотному зниженні тиску повітря на вході з 27 до 18 МПа за тиску рідини у вхідному патрубку 7,5 МПа.

Отримані результати створюють підґрунтя для проведення експериментальних випробувань натурного зразка та дозволяють надати рекомендації щодо розроблення удосконаленої конструкції піногенератора для подальших промислових досліджень [104].

РОЗДІЛ 4

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ РОБОТИ ПРИСТРОЮ (БУРОВИЙ МАЙДАНЧИК НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ «ПОЛТАВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА ІМЕНІ ЮРІЯ КОНДРАТЮКА»)

4.1 Програма і методика експериментальних досліджень, удосконаленого піногенератора

Експериментальні дослідження процесу буріння свердловин є невід’ємним і важливим етапом наукової діяльності. Вони забезпечують як якісну, так і кількісну оцінку точності математичних розрахунків розроблених для аналізу різних технологічних процесів, комп’ютерного моделювання раціональних, ефективних режимів роботи пристроїв циркуляційної системи бурової установки.

Буріння свердловин належить до тих галузей, де значущі наукові й технічні досягнення здебільшого стали реальними завдяки комп’ютерному моделюванню. Це пов’язано з масштабами об’єктів дослідження, складністю процесів та значними витратами на проведення реальних промислових експериментів.

На сьогодні основним підходом до експериментального вивчення технологічних процесів у свердловині виступає використання аналогового та лабораторного моделювання. Однак є певні труднощі, що обмежують цей метод. Зокрема, великі розміри об’єктів ускладнюють процес коректної масштабної адаптації моделі, тоді як різноманітність явищ, що впливають на поведінку досліджуваного об’єкта, робить створення аналогових моделей ще більш складним завданням, проте, нами було використано «Буровий майданчик» Національного університету «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка» єдиний в Україні багатофункціональний навчально-науковий полігон. Справжня мобільна бурова установку, передана найбільшою приватною буровою компанією України ТОВ «Полтавська бурова компанія».

Буровий майданчик дає можливість здійснювати якісні практичні експериментальні дослідження та виробничі процеси у реальних умовах.

Проведення експериментальних досліджень узгоджено з відповідними відділами та затверджені розпорядженням відповідальних осіб Національного університету «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка» та за участю працівників ТОВ «НТП «Бурова техніка».

Експериментальні дослідження модернізованого піногенератора були зосереджені на оцінці його функціональності та ефективності в умовах реального використання. Програма випробувань охоплювала різноманітні аспекти, спрямовані на аналіз технічних параметрів та функціональних можливостей обладнання.

На початкових стадіях життєвого циклу піногенератора було проведено ґрунтовні дослідження, спрямовані на розробку та раціональність його конструкційних особливостей. У ході цих досліджень здійснювалося моделювання та технічний аналіз ключових параметрів, що визначають ефективність роботи піногенератора. До таких параметрів належали: тиск, витрати рідини та повітря, а також стабільність процесу утворення піни.

Тривалість та обсяги проведених випробувань змінювались відповідно до наявних ресурсів і конкретних потреб дослідження, проте ключовим аспектом було забезпечення достатньої кількості експериментів, необхідних для об'єктивного оцінювання ефективності функціонування піногенератора.

У ході досліджень було розглянуто різноманітні аспекти, включаючи надійність, безпечність, транспортабельність та технологічну ефективність обладнання. Результати оцінки цих характеристик дозволили визначити, наскільки піногенератор відповідає умовам запланованого використання та специфіці окремих галузей промисловості. Окрему увагу також приділено його здатності задовольняти вимоги щодо ефективності та екологічної безпеки.

4.1.1 Мета експериментальних досліджень

Встановлення верифікації даних отриманих математичними розрахунками та шляхом комп'ютерного моделювання ефективних, раціональних режимів роботи піногенератора, для проведення промислових досліджень запропонованого удосконаленого, модернізованого піногенератора за призначенням для промивання свердловин пінами.

4.1.2 Опис, місця експериментальних досліджень

Місце експериментальних досліджень – буровий майданчик Національного університету «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка» – є обраною локацією для проведення експериментальних досліджень.

Багатофункціональний навчально-науковий полігон «Буровий майданчик», облаштований мобільною буровою установкою канадського виробництва — KREMSO K-750. На території університету пробурена 14-метрова свердловина.



Рисунок 4.1 – Мобільна бурова установка KREMSO K-750 Національного університету «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»

Мобільна бурова установка стендового типу оснащена шасі з шістьма осями, щоглою висотою 35 метрів, яка обладнана кронблоком. До її складу входять бурова лебідка, два дизельні двигуни як основні приводи, трансмісія, гакоблок, талева оснастка, а також конструктивна основа самої бурової установки. Дана установка має максимальну вантажопідйомність у 143 тонни та номінальну вантажопідйомність у 110 тонн. Заявлена умовна глибина буріння свердловин сягає 2500 метрів, тоді як максимальна глибина при здійсненні капітального ремонту свердловин становить 7000 метрів. Сумарна потужність приводу складе 750 кВт.



Рисунок 4.2 – Мобільної бурова установка KREMCO K-750 (циркуляційна система) Національного університету «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»

Компанія Експерт Нафтогаз виконала розробку паспорта для об'єкта «Мобільна бурова установка K-750», а також підготувала звіт експертного обстеження щодо відповідності технічного стану стендової мобільної бурової установки KREMCO K-750 вимогам чинних нормативно-правових актів з охорони праці та промислової безпеки.

Державне підприємство «Карпатський експертно-технічний центр Держпраці», що є спеціалізованим центром експертної технічної підтримки державного нагляду у сфері нафтогазовидобувної промисловості України, розробило та затвердило висновок експертизи. Документ підтверджує відповідність проєктної документації вимогам законодавства і нормативно-правових актів з охорони праці щодо «Навчально-робочого проєкту на монтаж навчальної стендової мобільної бурової установки KREMSO K-750» на території Національного університету «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка».

Вибір цієї конкретної свердловини обумовлений кількома факторами

1. це реальна свердловина, що дозволяє проводити випробування в реальних умовах експлуатації;
2. буровий майданчик, має всі необхідні нормативні документи, а також, дослідження відбуваються за участю відповідальних осіб Національного університету «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка» та працівників ТОВ «НТП «Бурова техніка»;
3. доступність для проведення експериментальних досліджень, зручний доступ до обладнання та необхідних ресурсів для випробувань.

4.1.3 Процедура і послідовність експериментальних досліджень дослідного зразка

Проведемо розрахунки необхідного тиску рідини на вході у піногенератор для оптимальних режимів його роботи по енергоефективності (при витраті рідини $0,01 \text{ м}^3/\text{с}$ і $0,015 \text{ м}^3/\text{с}$). Отримані результати покажемо у вигляді графіків (рис. 4.3 і 4.4).

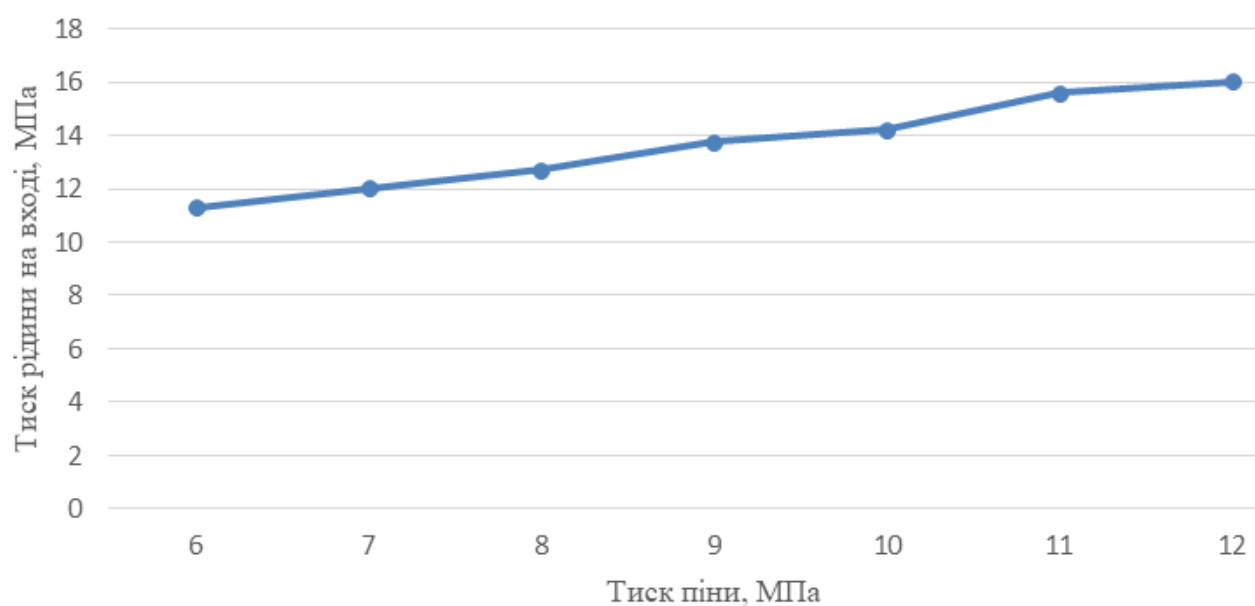


Рисунок 4.3 – Експериментальні значення тиску рідини на вході у піногенератор при витраті рідини 0,01 м³/с

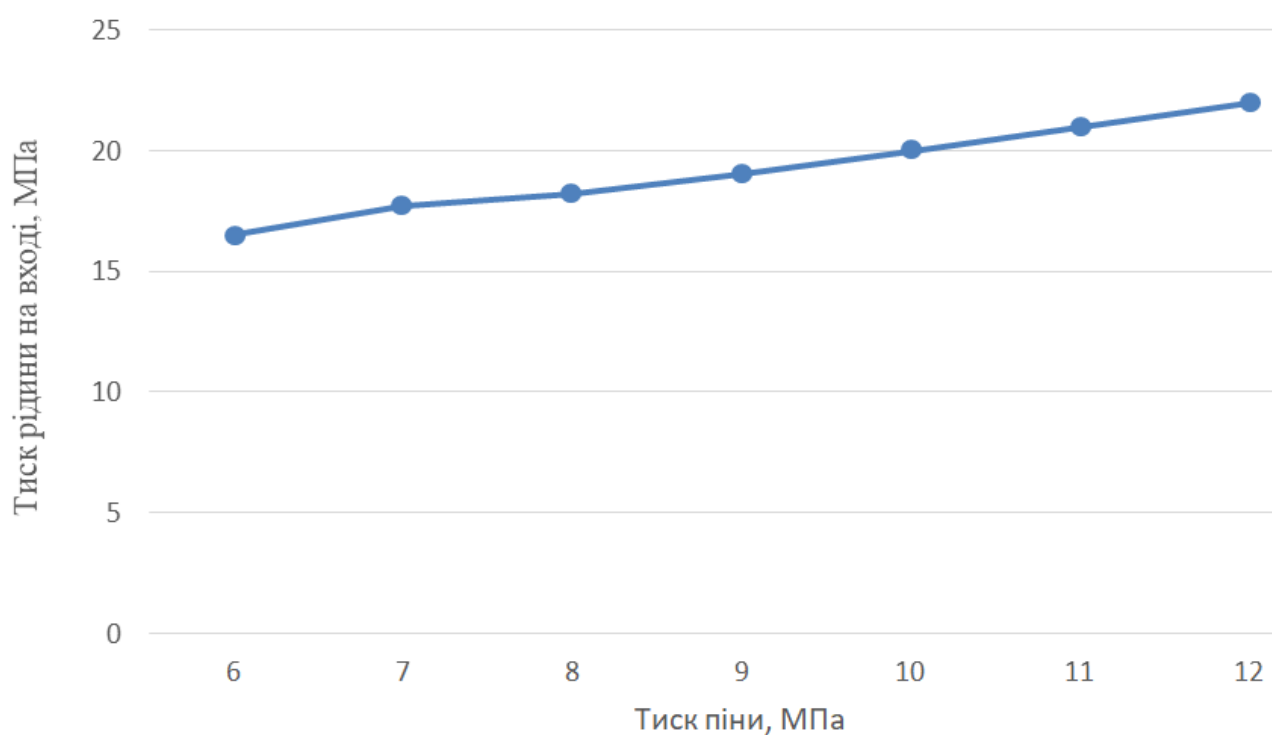


Рисунок 4.4 – Експериментальні значення тиску рідини на вході у піногенератор при витраті рідини 0,015 м³/с

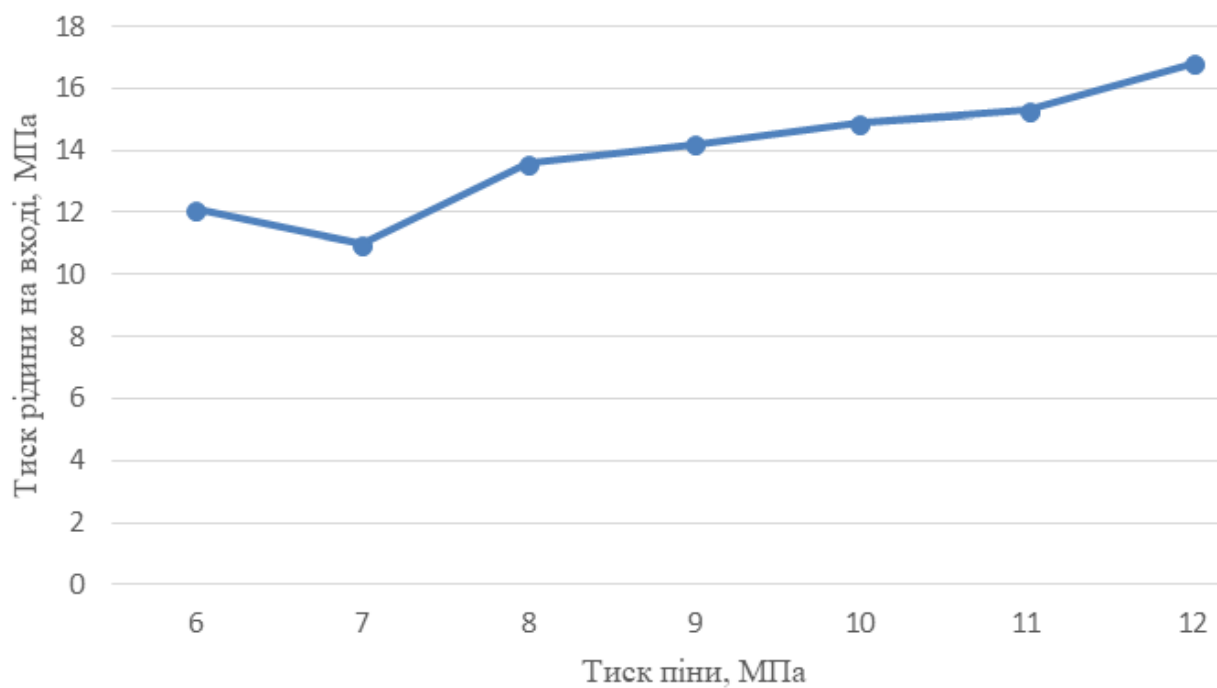


Рисунок 4.5 – Експериментальні значення тиску рідини на вході у піногенератор при витраті рідини 0,01 м³/с

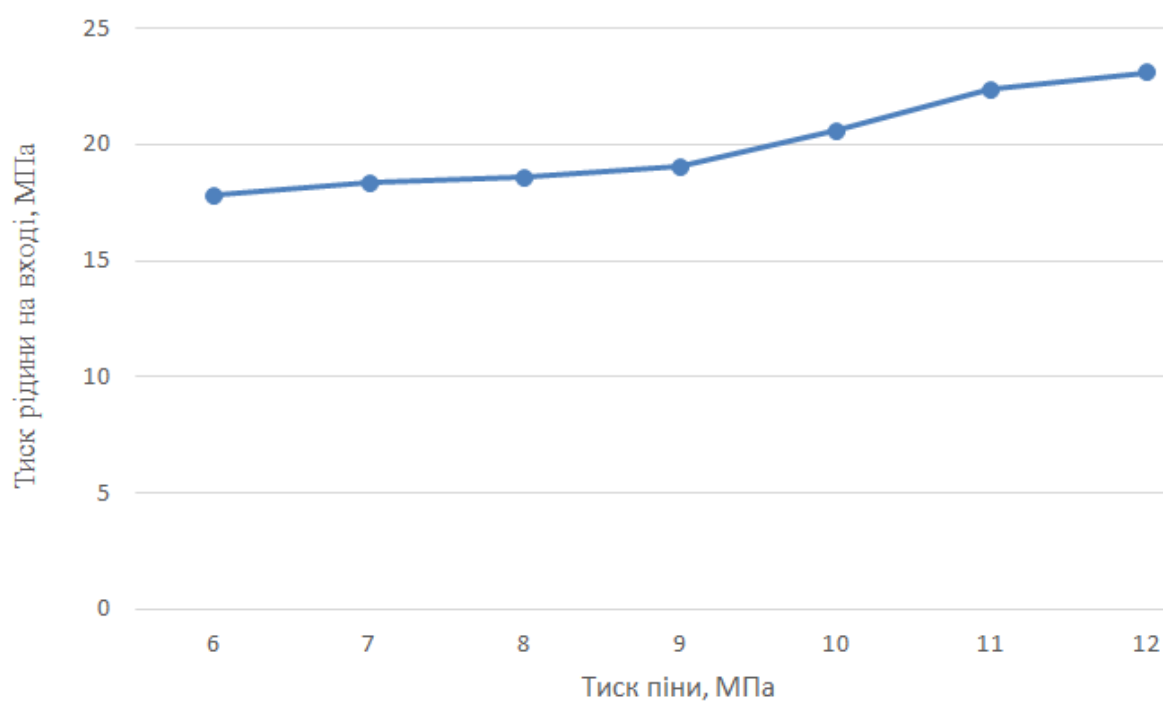


Рисунок 4.6 – Експериментальні значення тиску рідини на вході у піногенератор при витраті рідини 0,015 м³/с

Аналіз отриманих графіків показує, що при найбільшому коефіцієнті енергоефективності піногенератора при витраті рідини $0,01 \text{ м}^3/\text{с}$ і при тиску піни 8 МПа тиск рідини на вході 12,7 МПа, а при витраті рідини $0,015 \text{ м}^3/\text{с}$ і при тиску піни 8 МПа тиск рідини на вході 18,2 МПа. Для підтвердження результатів аналітичних досліджень будуть проведені експериментальні дослідження.

Для перевірки достовірності результатів теоретичних досліджень проведено експериментальні дослідження модернізованого піногенератора

На основі отриманих графічних залежностей значення тиску рідини на вході у піногенератор при витраті рідини $0,01 \text{ м}^3/\text{с}$ і $0,015 \text{ м}^3/\text{с}$ зроблені порівняння експериментальних досліджень із теоретичними (рис. 4.3 і 4.4). Отримані дані наведені в таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 – Порівняння експериментальних досліджень із теоретичними, відсоток, для різних тисків піни на виході та витратах рідини $0,01 \text{ м}^3/\text{с}$ і $0,015 \text{ м}^3/\text{с}$

Тиск піни на виході з піногенератора, МПа	Витрата рідини, $\text{м}^3/\text{с}$	
	0,01	0,015
6	7,08	7,88
7	8,33	3,95
8	7,2	2,2
9	2,9	0,52
10	4,93	3,0
11	1,92	1,9
12	5,0	5,0

Наведені результати табл. 4.1 вказують на співпадання у високій мірі проведених експериментальних досліджень із встановлення оптимальних

параметрів і режимів роботи обладнання для промивання нафтогазових свердловин пінистими розчинами. Близькість значень відповідно до результатів експериментальних і теоретичних досліджень (максимальне відхилення 8,33 %), а також успішне утворення стійкої піни свідчать про достовірність отриманих даних та готовність піногенератора до впровадження в промислову сферу.

4.1.4 Дослідження стійкості піни

Дослідження стійкості піни проводилося за умов навколишнього середовища, за яких сумарна похибка методики визначення перебувала в межах заданого рівня:

- температура повітря від +12 до +25°C;
- атмосферний тиск від 82 до 105,7 кПа;
- відносна вологість повітря від 41% до 89%.

Під час проведення дослідів умови були такими: температура повітря від +14°C, атмосферний тиск від 98,92 кПа, відносна вологість повітря від 63%.

Також для випробування було використано:

- ваги з межею зважування 10 кг з ціною поділки 0,005 кг;
- манометр згідно з ГОСТ 2405 з верхньою межею вимірювання 1 МПа і ціною поділки 0,01 МПа;
- термометр згідно з ГОСТ 28498 з діапазоном вимірювання від 0 до 100°C і ціною поділки 1°C;
- циліндр 1-500 згідно з ГОСТ 1770 з ціною поділки 10 см³;
- секундомір з межею вимірювання 3600 с і ціною поділки 0,2 с;

– вода питна згідно з ГОСТ 2874;

– посудина мірна об'ємом 12 дм³.

Кожну серію дослідів було проведено 5 раз. Кожного разу ми готували піну нового робочого розчину заданої концентрації (6%) та температурою 19°C.

Отримані результати досліджень із визначення стійкості піни приведені в таблиці.

Таблиця 4.2 – Результати досліджень із визначення стійкості піни

	Об'єм піни, л	Кратність піни	Середня кратність піни	Час руйнування піни, с
I серія дослідів	2,8	13,7	13,78	2621
II серія дослідів	2,04	13,5		1910
III серія дослідів	3	14		2808
IV серія дослідів	2,6	13,9		2434

Отримані результати вказують на те, що піна, отримана модернізованим піногенератором, має достатню стійкість і здатна працювати в умовах буріння свердловин з аномально низькими пластовими тисками.

Висновки до розділу 4

Експериментальні дослідження удосконаленого, модернізованого піногенератора підтвердили його ефективність, безпечність і надійність у реальних умовах використання, а саме:

1. пристрій стабільно утворював та подавав піну в циркуляційну систему для промивання свердловин. Всі технічні параметри, такі як густина,

ступінь аерації та стабільність піни, відповідали встановленим стандартам. Конструкція піногенератора виявилася зручною для встановлення, транспортування і обслуговування, а можливість швидкого розбирання основних компонентів зменшує витрати на експлуатацію;

2. випробування засвідчили, що піногенератор не має дефектів і підходить для тривалої роботи в польових умовах. Екологічна безпека пристрою підтверджена, оскільки використання сульфанола відповідає сучасним екологічним вимогам. Технологія показала високу ефективність, що дозволяє рекомендувати її для впровадження у нафтогазову галузь.

3. досить близькі показники експериментальних і теоретичних досліджень (максимальне відхилення 8,33 %) разом із формуванням стійкої піни підтверджують верифікацію отриманих результатів і готовність піногенератора до промислових випробувань.

РОЗДІЛ 5

ПРОМИСЛОВІ ДОСЛІДЖЕННЯ, ВИПРОБУВАННЯ УДОСКОНАЛЕНОГО ПІНОГЕНЕРАТОРА ЦИРКУЛЯЦІЙНОЇ СИСТЕМИ БУРОВОЇ УСТАНОВКИ

5.1 Програма і методика промислових досліджень, випробувань удосконаленого піногенератора

Для проведення промислових досліджень, випробувань розроблено програму і методику, які були узгоджені з відповідними відділами та затверджені розпорядженням відповідальних осіб ТОВ «Нафтогазенергія».

Промислові дослідження, випробування запропонованого піногенератора мали на меті оцінити його працездатність та ефективність у реальних умовах експлуатації. Випробування включали широкий спектр досліджень, спрямованих на аналіз функціональних можливостей та технічних характеристик обладнання (Додаток Б).

На початкових етапах життєвого циклу піногенератора проводилися дослідницькі випробування, спрямовані на розробку та вдосконалення конструкції. Ці дослідження охоплювали моделювання і технічний аналіз параметрів, що впливають на роботу піногенератора, таких як тиск, витрата рідини та повітря, стабільність утворення піни тощо.

Промислові дослідження, випробування проводилися на реальних об'єктах, включаючи свердловини, що дозволило оцінити роботу піногенератора в умовах, максимально наближених до реальних. Такий підхід забезпечує врахування всіх особливостей його функціонування у польових умовах.

Тривалість і масштаби випробувань варіювалися залежно від потреб і доступних ресурсів, але важливим було забезпечення достатньої кількості експериментів для адекватної оцінки роботи піногенератора.

Випробування охоплювали різні аспекти, включаючи надійність, безпеку, транспортабельність і технологічність обладнання. Оцінка цих параметрів дозволила визначити придатність піногенератора для використання в заданих

умовах і галузях промисловості, а також його відповідність вимогам щодо ефективності та екологічної безпеки.

За результатами випробувань проводиться аналіз, який може бути неруйнівним, тобто не вимагає знищення об'єкту для оцінки його властивостей. Це дозволяє зберегти піногенератор для подальшого використання після випробувань.

1. Дослідницькі випробування: Це етап, коли проводяться дослідження на стадії життєвого циклу піногенератора. Вони спрямовані на виявлення потенційних проблем, оптимізацію конструкції та вдосконалення функціональності.

2. Промислові дослідження, випробування: Випробування в реальних промислових умовах на справжній свердловині або в промисловому середовищі дозволяють оцінити реакцію устаткування на різні фактори та забезпечити його надійність та ефективність.

3. Натурні випробування: Проведення випробувань на реальній свердловині або в аналогічних умовах натурального середовища, що дозволяє отримати об'єктивні дані про роботу піногенератора в реальних умовах експлуатації.

4. Випробування на надійність, безпечність та транспортабельність: Оцінка надійності та безпечності роботи піногенератора під час різних умов експлуатації, а також його можливості для транспортування та монтажу.

5. Функціональні випробування: Оцінка відповідності функціональних можливостей піногенератора вимогам та цілям його застосування.

6. Неруйнівні випробування: Використання методів, що не пошкоджують піногенератор, для оцінки його характеристик та стану, таких як візуальний огляд, вимірювання параметрів та інші діагностичні методи.

5.1.1 Мета промислових досліджень, випробувань

Встановлення функціональних можливостей запропонованого удосконаленого піногенератора за призначенням для промивання свердловин пінами.

5.1.2 Опис, місця промислових досліджень, випробувань (свердловина №1 Майорівської площі)

Місце випробувань – свердловина №1 на Майорівській площі – є обраною локацією для проведення випробування та тестувань удосконаленого піногенератора. Знаходячись на Майорівській площі, ця свердловина представляє собою важливий об'єкт для нафтогазової промисловості.

Вибір цієї конкретної свердловини обумовлений кількома факторами. По-перше, це реальна свердловина, яка в майбутньому буде використовуватись для видобутку, що дозволяє проводити випробування в реальних умовах експлуатації. По-друге, Майорівська площа відповідає специфічним вимогам і потребам дослідження з урахуванням її геологічних і технічних характеристик.

Ця локація також була вибрана через свою доступність для проведення досліджень, зручний доступ до обладнання та необхідних ресурсів для випробувань. Таким чином, свердловина №1 на Майорівській площі є ідеальним місцем для проведення випробувань і встановлення функціональних можливостей удосконаленого піногенератора.

Свердловина №1 Майорівська площа розташована у Полтавському районі Полтавської області, Україна (рис. 5.1). Вона знаходиться приблизно за 21 кілометр на північний захід від селища міського типу Чутове. Ця свердловина є об'єктом нафтогазової промисловості та має стратегічне значення для видобутку газоконденсатної суміші.



Рисунок 5.1 – Бурова установка Drillmes, свердловина №1 Майорівська
площа

Згадана свердловина буриться та має розгалужену систему нафтогазового обладнання. Розташування цієї свердловини може відображати специфіку геологічних умов у цьому регіоні, що робить її ідеальною для проведення випробувань нового обладнання, такого як піногенератор.

5.1.3 Номенклатура технічних показників, які необхідно визначити в процесі випробувань

Можливість і зручність встановлення запропонованого удосконаленого піногенератора на реальну циркуляційну систему або додаткову обв'язку для промивання свердловини піною.

Виконувані функції – піноутворення і гарантоване надійне постачання піни у свердловину.

Технологічні показники:

- параметри свердловини;
- тиски рідини, піни та повітря в гідравлічному ежекторному змішувачі;
- ступінь аерації та густина піни;
- безпечність гідравлічного ежекторного змішувача.

5.1.4 Опис дослідного зразка, для проведення випробувань



Рисунок 5.2 –Удосконалений піногенератор

5.1.5 Принцип роботи дослідного зразка - піногенератора

Модернізований піногенератор складається з корпусу циліндричної форми, всередині якого розміщено змішувач рідини й повітря з ущільнювальними кільцями, втулки з камерами попереднього змішування, канал для підведення повітря, розпірні кільця з індивідуально розташованими паралельними дифузорами, притискні кільця, завихрювач пінної суміші з напрямними лопатками та загальний дифузор із камерою турбулентного змішування. У змішувачі передбачені вертикальні отвори для надходження рідини та горизонтальні отвори, з'єднані з вертикальними, для підведення повітря.

Робота піногенератора полягає в насиченні рідини повітрям з подальшим утворенням піни. Рідина надходить у корпус пристрою, звідки через отвори змішувача потрапляє до камер попереднього змішування. Одночасно до змішувача поступає стиснуте повітря через канал у корпусі та систему отворів у змішувачі рідини й повітря. Після виходу із змішувача повітря також надходить у камери попереднього змішування, де утворюються області збільшеної турбулентності в зоні взаємодії потоків.

У камерах змішування, сформованих розпірними та притискними кільцями, відбувається інтенсивна турбулізація потоків, перемішування повітря із рідинною фазою та формування пінної структури. Після цього розчин надходить до завихрювача пінистого розчину, який забезпечує додаткове ефективне перемішування та стабільне утворення піни у камері змішування, розташованій у дифузорі. Тут рідина рухається у турбулентному режимі, що сприяє остаточному насиченню рідини повітрям і закріпленню процесу піноутворення [104].



Рисунок 5.3 – Удосконалений піногенератор на випробуваннях

5.1.6 Прилади контролю параметрів, що визначаються при випробуванні дослідного зразка

- Три манометри ОБМ-160 зі шкалою не менше 16 МПа;
- Термометр для визначення температури повітря в межах $-30^{\circ}\text{C} - +80^{\circ}\text{C}$;
- Термометр для визначення температури рідини в межах $0^{\circ}\text{C} - +90^{\circ}\text{C}$;
- Рулетка для вимірювання довжини в межах 0 – 5 метрів;
- Ємності об'ємом до 10 л (дм³) для забору промивальної рідини з метою її дослідження;
- Аерометр.

5.1.7 Процедура і послідовність випробувань дослідного зразка

Згідно запропонованої принципової схеми ділянки під'єднання удосконаленого піногенератора для випробування в промислових умовах

необхідно провести підготовчі роботи на циркуляційному комплексі бурової установки.

Монтаж і встановлення контрольно-вимірювальних приладів проводиться згідно рекомендацій.

Після завершення монтажу проводиться короточасна подача повітря і рідини на протязі не більше 5хв. Після зупинки подачі повітря і рідини перевіряються всі складові частини і місця з'єднання ділянки піногенеруючого пристрою на герметичність.

Після випробувань перевіряються всі складові частини і місця з'єднання на цілісність.

Подальший процес випробування і дослідження удосконаленого піногенератора циркуляційної системи бурової установки проводиться за погодженням та розпорядженням відповідальних осіб від ТОВ «Нафтогазенергія».

За результатами випробувань сформовано таблиці технічних показників, які були визначені в процесі випробувань:

Таблиця 5.1 Дослідження витрати рідини на вході в піно генератор

Тиск рідинного струменя на вході в піногенератор	Витрата рідинного струменя на вході в піногенератор	Тиск повітряного струменя на вході в піногенератор	Витрата повітряного струменя на вході в піногенератор	Тиск пінного струменя на виході з піногенератора	Витрата пінного струменя на виході з піногенератора
P1, МПа	Q1, м ³ /с	P2, МПа	Q2, м ³ /с	P3, МПа	Q3, м ³ /с
6,32	0,001	10	0,003	6	0,006
7,8	0,005	10	0,003	6	0,0105
11,3	0,01	10	0,003	6	0,017
16,5	0,015	10	0,003	6	0,037
24,5	0,02	10	0,003	6	0,065
34,5	0,025	10	0,003	6	0,13

Таблиця 5.2 Дослідження при заданій витраті рідини 0,015 м³/с при різних тисках піни на виході піногенератора

Тиск рідинного струменя на вході в піногенератор	Витрата рідинного струменя на вході в піногенератор	Тиск повітряного струменя на вході в піногенератор	Витрата повітряного струменя на вході в піногенератор	Тиск пінного струменя на виході з піногенератора	Витрата пінного струменя на виході з піногенератора
P1, МПа	Q1, м ³ /с	P2, МПа	Q2, м ³ /с	P3, МПа	Q3, м ³ /с
22	0,015	10	0,003	12	0,020
21	0,015	10	0,003	11	0,021
20	0,015	10	0,003	10	0,021
19	0,015	10	0,003	9	0,022
18,2	0,015	10	0,003	8	0,023
17,7	0,015	10	0,003	7	0,025
16,5	0,015	10	0,003	6	0,028

Наведені результати табл. 4.2 вказують на співпадання у високій мірі проведених досліджень із встановлення оптимальних параметрів і режимів роботи обладнання для промивання нафтогазових свердловин пінистими розчинами. Збіжність результатів промислових досліджень, випробувань, а також аналітичних і математичних розрахунків, разом з отриманням стійкої піни, свідчить про достовірність цих даних та готовність піногенератора до використання у промислових умовах.

Після завершення випробувань складові елементи внесені в конструкцію демонтуються, очищаються від бруду і перевіряється їхній стан.

5.1.8 Вимоги до техніки безпеки при випробуванні

Дотримуватись правил безпеки згідно вимог «Правил безпеки у нафтогазовидобувній промисловості України» [54].

Після монтажу пристрою в циркуляційній системі при запуску та

опресуванні необхідно знаходитись на безпечній відстані.

Забороняється проводити усунення негерметичностей під час роботи циркуляційної системи.

Всі необхідні роботи дозволяється проводити з удосконаленням піногенератором тільки при відсутності тиску в циркуляційної системи бурової установки.

5.1.9 Обробка і оформлення результатів випробування

Вся інформація, отримана в процесі випробувань удосконаленого піногенератора, заноситься в журнал випробувань з вказанням дати, часу і прізвища (П.І.П.) особи, яка заносить інформацію в журнал.

На основі зібраної інформації про проведення промислових випробувань удосконаленого піногенератора комісією, створеною з представників ТОВ «Нафтогазенергія», складається акт про результати випробування і даються рекомендації щодо подальших дій з даною розробкою.

5.2 Підготовка устаткування до промислових випробувань

Підготовка устаткування до промислових випробувань удосконаленого піногенератора передбачає кілька етапів:

За допомогою агрегата 4АН-700 був створений пінистий розчин і закачаний у свердловину. Визначення параметрів відбувалося за допомогою манометрів, якими оснащений агрегат і компресор. Для створення пінистого розчину використовувалася поверхнево-активна речовина – сульфанол.

Основна частина випробування – запропонована конструкція удосконаленого піногенератора циркуляційної системи бурової установки.

В процесі проведення промислових досліджень і випробувань удосконаленого піногенератора комісією встановлено, що:

- розроблений удосконаленого піногенератора є ефективним і безпечним при експлуатації в промислових умовах;
- розроблена конструкція удосконаленого піногенератора є зручною при встановленні її в існуючу циркуляційну систему або в додаткову обв'язку;
- у випробувальному удосконаленого піногенератора є можливість без додаткових зусиль та обладнання розбирати ключові вузли;
- після випробувань і досліджень в удосконаленому піногенераторі дефектів та пошкоджень не виявлено і він може використовуватись в подальшому на свердловинах, які буряться.

Були виконані контрольні вимірювання: Перед початком випробувань необхідно здійснити контрольні вимірювання базових параметрів, таких як температура, тиск тощо. Це допоможе забезпечити правильність результатів експерименту.

Документування: важливим етапом є документування всіх процесів підготовки та випробувань. Це включає ведення журналу підготовки, фіксацію параметрів установки та отриманих результатів для подальшого аналізу.

Дотримання цих етапів дозволило забезпечити ефективні та надійні промислові випробування удосконаленого піногенератора.

5.3 Промислові дослідження і випробування удосконаленого піногенератора

Промислові дослідження і випробування удосконаленого піногенератора є ключовим етапом в оцінці його функціональності та ефективності перед впровадженням у виробництво [104]. Цей процес передбачає ретельне тестування у реальних умовах експлуатації, щоб переконатися у його відповідності вимогам та можливостях.

Важливі аспекти цього етапу включають:

1. Планування експерименту: Визначення мети та обсягу випробувань, встановлення критеріїв оцінки ефективності та параметрів, що підлягають вимірюванню.

2. Підготовка устаткування: встановлення удосконаленого піногенератора в робоче положення, налаштування параметрів та забезпечення його готовності до випробувань.

3. Виконання експерименту: здійснення серії випробувань згідно з планом, реєстрація відповідних параметрів та контроль за процесом.

4. Аналіз результатів: Оцінка отриманих даних, порівняння їх з початковими вимогами та встановленням відповідності. Виявлення потенційних проблем та шляхів їх вирішення.

5. Формування звіту: підготовка документації, що містить опис проведених випробувань, отримані результати, висновки та рекомендації.

Промислові дослідження і випробування удосконаленого піногенератора дозволяють забезпечити його раціональну роботу та відповідність вимогам перед його впровадженням у виробництво.

Висновки до розділу 5

Проведені промислові випробування удосконаленого піногенератора підтвердили:

1. достовірність, апробацію результатів аналітичних, математичних, експериментальних досліджень, які тотожні як в розрахунках, моделюванні, натурних випробуваннях так і під час промислових досліджень на діючому бровому комплексі Майорівської площі, свердловина №1;

2. раціональні, ефективні режими роботи циркуляційної системи бурової установки з модернізованим, удосконаленим піногенератором;

3. ефективність, безпечність та надійність у реальних умовах експлуатації. Піногенератор забезпечив стабільне утворення та подачу піни в

циркуляційну систему для промивання свердловин, застосовуючи енергетичний підхід до встановлення взаємозв'язку між якістю піноутворення та оцінювання ефективності роботи піногенератора;

4. всі технічні параметри, такі як густина, ступінь аерації та стабільність піни, відповідали встановленим вимогам. Конструкція пристрою продемонструвала зручність встановлення, транспортування та обслуговування, а можливість швидкого розбирання ключових вузлів забезпечує зниження витрат на експлуатацію.

Промислові дослідження, випробування, показали, що піногенератор не має дефектів і є придатним для тривалої роботи в польових умовах. Параметр оцінювання енергоефективності пристрою, через співвідношення енергій рідини, повітря і піни, продемонстрував високу ефективність роботи циркуляційної системи бурової установки, зменшивши при цьому енергетичні витрати на процес буріння.

Отримані результати промислових досліджень, які були зроблені на основі аналітичних, математичних досліджень та дослідження, що проводились за допомогою спеціалізованих програм комп'ютерного моделювання, будуть запропоновані, для масштабування на виробничих площадках інших нафтогазовидобувних компаніях України, забезпечуючи енергетичний підхід і раціональність процесів буріння, забезпечуючи незалежну

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

Дисертація являє собою завершену науково-дослідну роботу, в якій на підставі проведених аналітичних, математичних, експериментальних та промислових досліджень вирішено актуальне науково-практичне завдання щодо раціонального конструювання та рекомендації щодо умов експлуатації обладнання циркуляційної системи бурової установки. Це досягається шляхом модернізації, удосконалення пристроїв циркуляційної системи бурової установки, визначення раціональних, ефективних режимів роботи, адаптованих до специфічних умов буріння з аномально низькими пластовими тисками. Здобутки автора дозволяють зробити наступні висновки:

1. Проаналізовано сучасний стан досліджень у галузі буріння свердловин з аномально низькими пластовими тисками, зокрема розглянуто їхні специфічні особливості та потенційні шляхи для вдосконалення процесу. Виявлено, що ефективне очищення стовбура свердловини від шламу є ключовим чинником успішного промивання як вертикальних, так і скерованих свердловин в умовах аномально низьких пластових тисків. Одним із перспективних напрямів удосконалення цього процесу визначено застосування піногенераторів, що формують пінну речовину, яка замінює промивальні рідини і підвищує ефективність бурових робіт;

2. На основі удосконаленої функціональної залежності руху потоків рідини, повітря і піни та ефективності роботи піногенераторів при різних параметрах, проведено математичні дослідження геометричних параметрів піногенератора з обґрунтуванням нового принципу роботи, шляхом застосування багатоступеневих камер змішування, раціональних параметрів геометрії пристроїв, для формування піни;

Статистичним аналізом теоретичних залежностей визначено раціональні режими роботи піногенератора по тиску і подачі. Енергоефективність роботи цих пристроїв визначається здатністю утворювати піну з мінімальними

втратами енергії при заданих параметрах тиску та витрати на вході й виході. Досліджено аналітичним методом вплив змін робочих умов – зокрема тиску та витрати рідини – на ефективність функціонування піногенераторів

Вперше застосовано енергетичний підхід до визначення раціональних, ефективних режимів роботи піногенератора, вперше застосовано параметр оцінювання енергоефективності як співвідношення енергій потоків рідини, повітря і піни. Проведено чисельне моделювання процесів, що відбуваються в піногенераторах, за допомогою програмного комплексу FlowSimulation (SolidWorks). На основі отриманих результатів було визначено коефіцієнти енергоефективності при різних режимах роботи, що дозволило ідентифікувати найбільш раціональні параметри експлуатації циркуляційно системи бурової установки. Зокрема, досліджено діапазони тиску від 6 до 12 МПа та витрати рідини від 0,001 до 0,025 м³/с. Встановлено, що найменший коефіцієнт енергоефективності спостерігається при витраті рідини 0,001 м³/с і коливається в межах від 1 до 1,09. При збільшенні витрати рідини коефіцієнт енергоефективності зростає і при витраті рідини 0,015 м³/с коливається в межах від 1,25 до 1,59 (при тиску піни 8 МПа). Згідно проведених досліджень це є оптимальним, раціональним режимом роботи піногенератора з погляду співвідношення енергоспоживання до продуктивності.

При подальшому збільшенні витрати рідини коефіцієнт енергоефективності зменшується і при витраті рідини 0,025 м³/с коливається в межах від 1,14 до 1,45.

Відхилення параметрів від оптимального діапазону, як у бік зменшення, так і збільшення витрати, супроводжується зниженням енергоефективності, що зумовлює необхідність точного регулювання експлуатаційних режимів. Отримані результати мають прикладне значення для удосконалення методів розрахунку й проектування технологічного обладнання, оптимізації енергоспоживання в системах очищення рідин, а також для забезпечення високої екологічної та економічної ефективності виробничих процесів.

Запропонований підхід до чисельного моделювання із використанням програмного середовища FlowSimulation (SolidWorks) демонструє високу ефективність для аналізу й оптимізації параметрів гідродинамічного середовища і може бути адаптований до дослідження інших типів обладнання, що функціонують в умовах змінних режимів, що, у свою чергу, відкриває перспективи для створення комплексних енергоощадних технологій у різних галузях промисловості.

3. У процесі комп'ютерного моделювання досліджено модернізований піногенератор, продовження аналітичних, математичних досліджень, а саме, верифіковано отримані аналітичні, теоретичні залежності значень витрати повітря від витрати рідини, значення тиску піни на виході з ежекційного піногенератора, досягнення умов утворення піни, при тиску рідини у підвідному патрубку 10 МПа та 7,5 МПа. Визначено раціональні ефективні режими роботи пристроїв циркуляційної системи бурових установок, процесів утворення пінної суміші, враховуючи параметр оцінювання енергоефективності енергій рідини, повітря та піни.

Аналіз комп'ютерного моделювання досліджень розподілу тиску й швидкості в поздовжньому перерізі при зміні граничних умов, розподілу тиску в поздовжньому перерізі піногенератора (тиск повітря на вході 10 МПа) показує, що шляхом вдосконалення камери змішування у модернізованого піногенератора є можливість отримання тиску піни на виході 10 МПа, шляхом вдосконалення камери перемішування максимальна швидкість в поздовжньому перерізі піногенератора суттєво зменшилася (з 96 м/с до 80 м/с) і зменшується до швидкості звуку у водоповітряній суміші, що дає можливість скоротити камеру змішування (з 0,2 до 0,13 м), де відбувається стрибок ущільнення і утворюється піна, це в свою чергу визначає раціональні режими роботи піно генератора по тиску і подачі.

Стрибок ущільнення відбувається у модернізованому піногенераторі так само, як і в аналогічних пристроях, — при швидкості руху суміші близько

30 м/с, що дозволяє формувати піну з об'ємною газомісткістю від 0,2 до 0,8. Важливою перевагою модернізованого піногенератора, підтвердженою проведеними дослідженнями, є можливість забезпечувати тиск на виході 10 МПа при одночасному зниженні тиску повітря на вході з 14 МПа до 12 МПа.

Змінюючи граничні умови, а саме, зменшуючи тиск у підвідному патрубку до 7,5 МПа, тиск на виході з пристрою 10 МПа, і при збільшенні подачі рідини на вході до 0,02 м³/с максимальна швидкість в повздовжньому перерізі пристрою суттєво зменшилася (з 177,7 м/с до 159 м/с) і зменшується до швидкості звуку у водоповітряній суміші, це дозволяє зменшити камеру змішування (з 0,2 до 0,15 м), де відбувається стрибок ущільнення (рис. 3.6) і формується пінистий розчин. Процес стрибка ущільнення, аналогічно до попереднього дослідження, спостерігається при швидкості 30 м/с. У цій ситуації відбувається значне зниження тиску повітря на вході — з 27 до 18 МПа, що, у свою чергу, зумовлює зменшення тиску у підвідному патрубку.

Вирішено завдання верифікації аналітичних, математичних розрахунків, методом комп'ютерного моделювання, змодельовані раціональні, енергоефективні режими роботи піно генератора циркуляційної системи бурової установки.

4. Експериментальні дослідження дослідного зразка проведено на багатофункціональному навчально-науковому полігоні «Буровий майданчик» Національного університету «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка».

На основі отриманих графічних залежностей значення тиску рідини на вході у піногенератор при витраті рідини 0,01 м³/с і 0,015 м³/с зроблені порівняння експериментальних досліджень із теоретичними. Наведені результати вказують на співпадання у високій мірі проведених експериментальних досліджень із встановлення оптимальних параметрів і режимів роботи обладнання для промивання нафтогазових свердловин пінистими розчинами. Близькість результатів експериментальних і теоретичних

досліджень, із найбільшим відхиленням 8,33%, та успішне отримання стійкої піни підтверджують достовірність аналітичних і математичних розрахунків, наведених у попередніх розділах. Це свідчить про те, що модернізований піногенератор забезпечує ефективне й енергоощадне функціонування циркуляційної системи бурової установки.

5. Проведені промислові випробування удосконаленого піногенератора підтвердили його ефективність, надійність і безпечність у реальних умовах експлуатації. Пристрій забезпечив стабільне утворення та подачу піни в циркуляційну систему для промивання свердловин, відповідно до встановлених вимог щодо густини, ступеня аерації та стабільності піни. Конструктивні особливості піногенератора, зокрема його зручність у встановленні, транспортуванні й обслуговуванні, сприяють зниженню експлуатаційних витрат.

Результати випробувань засвідчили відсутність дефектів у конструкції, що підтверджує його придатність для тривалої роботи в польових умовах. Використання сульфанола, як основного реагенту, відповідає сучасним екологічним стандартам, що підвищує екологічну безпеку технології.

Досягнуті показники ефективності дозволяють рекомендувати удосконалений піногенератор для впровадження у виробничий процес нафтогазової галузі. Отримані результати можуть стати основою для подальших наукових досліджень, вдосконалення конструкції та розширення сфери застосування на інші галузі промисловості.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Аналіз і раціоналізація конструкції піногенеруючого устаткування або пристрою / В.М. Савик, М.М. Лях, В.М. Вакалюк, Я.В. Солоничний // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – Івано-Франківськ : ІФНТУНГ, 2012. – №3 (44) – С. 63 – 69.
2. Аністратенко В. О., Федоров В. Г. Математичне планування експериментів в АПК. Київ : Вища шк., 1993. 375 с.
3. Білецький В. С. Основи нафтогазової інженерії [Текст] / Білецький В. С., Орловський В. М., Вітрик В. Г. – Львів: «Новий Світ-2000», 2019 – 416 с.
4. Білецький В.С., Вітрик В.Г., Матвієнко А.М. та ін. Проектування бурового і нафтопромислового обладнання – Полтава: ПолтНТУ, 2015 – 196 с.
5. Бойко В.С. Регулювання розробки газонафтових покладів шляхом закачування керованих дисперсних систем // Нафтова і газова промисловість. - Київ. -1992.-№2.-С. 39-42.
6. Бойко В.С. Технологія вирівнювання проникнісної неоднорідності колектора на основі застосування дисперсних систем з метою інтенсифікації видобутку нафти і газу та ізоляції припливу води: Рекламний проспект. - Мін. освіти України, ІФДТУНГ, Івано-Франківськ, 1997. - 4 с
7. Бойко В.С. Довідник із нафтової справи. – К.: Вища школа, 1996. – 620 с.
8. Бойко В.С. Розробка та експлуатація нафтових родовищ – 4-е доповнене видання. – Київ: Міжнародна економічна фундація, 2008. – 488 с.
9. Вдосконалена конструкція піногенератора для очистки та інгібування від корозії газопромислового обладнання / В.В. Дячук, В.М. Гончаров, І.І. Капців, СВ. Чопань, Р.В. Бойко // Збірник УкрНДІгаз „Питання розвитку газової про-мисловості України". - Харків, 2005.

10. Використання LMS MOODLE в дистанційному навчанні / В.М. Савик, П.О. Молчанов, Суржко Т.О., Книш М.І., Ю.П. Ілляшенко // Тези всеукраїнської науково-практичної інтнет-конференції «Формування цифрового освітнього середовища професійного розвитку фахівців в умовах відкритого університету післядипломної освіти» 21-22 червня Київ 2022. С 69–70.

11. Використання багатосоплових піногенеруючих пристроїв для виготовлення пінистих розчинів при розкриванні продуктивних пластів з низькими пластовими тисками / В.М. Тимошенко, В.М. Савик, В.П. Троцький, М.М. Лях // Питання розвитку газової промисловості України : збірник наукових праць – Харків : УкрНДІгаз, 2010. – Вип. 38. – С. 60 – 63.

12. Використання елементів дистанційного навчання в освітньому процесі / Василь Савик, Тетяна Суржко, Максим Книш, Юрій Ілляшенко // II Всеукраїнська науково-практична інтернет-конференція «Формування цифрового освітнього середовища професійного розвитку фахівців в умовах відкритого університету післядипломної освіти», 25-26 травня 2023 року Київ: 2023.

13. Використання ПАР (спінювачі і деемульгатори) при видобуванні і підготовці рідких вуглеводнів в ГПУ "Полтавагазвидобування" / Л.В. Роботько, Д.Т. Мірошніченко, М.С. Педик, О.М. Кітура, А.Є. Сказко. Питання розвитку газової промисловості України. 2012. Вип. XL. С. 186- 190.

14. Використання ПАР піноутворювачів при видобуванні рідких вуглеводнів на родовищах ГПУ "Львівгазвидобування" / Л.В. Роботько, В.Л. Отрішко, Д.Т. Мірошніченко, М.С. Ліпнягов, А.Є. Сказко, Д.Р. Пітула. Питання розвитку газової промисловості України. 2015. Вип. XLIII. С. 62- 67.

15. Войтенко В.С. Технологія і техніка буріння: узагальнююча довідникова книга. – Львів: Центр Європи, 2012. – 708 с.

16. Воловецький В.Б. Освоєння свердловин на завершальній стадії розробки родовищ / В.Б. Воловецький, В.І. Коцаба, С.В. Василенко,

О.М. Щирба, А.В. Гнітко, А.В. Дьомін // Питання розвитку газової промисловості України: зб. наук. праць.– Харків: УкрНДІгаз, 2017. – Вип. XLV. – С. 135 – 140.

17. Воловецький В.Б. Особливості видобування вуглеводнів на Юліївському НГКР / В.Б. Воловецький, О.М. Щирба, О.Ю. Витязь, В.В. Величко, В.І. Коцаба, С.В. Василенко // Науковий вісник ІФНТУНГ. – 2017. – Вип. 1 (42). – С. 33–45.

18. Гутак О. В. Аналіз зв'язків показників ефективності процесу буріння на засадах системного підходу / О. В. Гутак, Г. Н. Семенцов // Нафтогаз. енергетика. – 2009. – № 2. – С. 94-99.

19. Довідник з нафтогазової справи / за заг. ред. д-рів техн. наук В.С. Бойка, Р.М. Кондрата, Р.С. Яремійчука. К.: Львів, 1996. 620 с

20. Дорошенко В.М. Основи наукових досліджень: навчальний посібник. Київ: ІСДО, 1993. 128 с.

21. Дослідження процесу піноутворення в піногенеруючих пристроях ежекторного типу / В.М. Савик, М.М. Лях, В.М. Вакалюк, Н.В. Федоляк // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – Івано-Франківськ : ІФНТУНГ, 2012. – №4 (45) – С. 110 – 117.

22. Дослідно-промислові випробування технології очищення внутрішньої порожнини шлейфів свердловин Хідновицького газового родовища / Р.М. Кондрат, А.В. Угриновський, О.С. Сендега, В.Є. Блізняков, Т.В. Потятинник. Науковий вісник Національного гірничого університету. 2018. № 1. С. 12-19.

23. Дячук В.В., Бікман Є.С., Кисельова С.О.. Проектування, розробки та облаштування газових (газоконденсатних) родовищ: навч. посібник. Х.: Бурун і К, 2009. 304 с.

24. Енергетичні установки нососо-циркуляційної системи / Т.О. Суржко, М.І. Книш, В.Б. Панюта, Ю.П. Ілляшенко // Тези XVI Міжнародній науково-технічній конференції «ABIA-2023», 18-20 квітня 2023 року Київ. С 69–70.

25. Енергетичні установки нососо-циркуляційної системи / Т.О. Суржко, М.І. Книш, В.Б. Панюта, Ю.П. Ілляшенко // Тези XVI Міжнародна науково-технічна конференція “ABIA-2023” 18-20 квітня 2023 року – Київ: 2023. С 69–70.

26. Катеринчук П.О. Освоєння, інтенсифікація та ремонт свердловин / П.О. Катеринчук, Д.В. Римчук, С.В. Цибулько, О.Л. Шудрик – Х.: Пром-Арт, 2018. – 608 с.

27. Коцкулич Я.С. Закінчування свердловин : підручник для студентів вищ. навч. закладів проф. спрямування "Буріння" / Я.С. Коцкулич, О.В. Тищенко. – К.: Інтерпрес ЛТД, 2004. – 366 с.

28. Лігоцький М. В. Оптимальні швидкості у кільцевому просторі для винесення вибуреної породи. *Нафтова і газова промисловість*. 2002. № 4. С. 24–25.

29. Лужаниця О.В. До питання удосконалення технології первинного розкриття продуктивних горизонтів з аномально низькими пластовими тисками / О.В.Лужаниця, Ю.О.Педенко, І.П.Долюк та ін. – Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – Івано-Франківськ : ІФНТУНГ, 2005. – №3 (16). – С. 9 – 14.

30. Лях М.М. (2017). Experimental and industrial research pinogenerating devices. / М.М. Лях, В.М. Савик, П.О. Молчанов // Науковий вісник національного гірничого університету. Науково – технічний журнал. №5 (161) - 2017. Дніпро, 2017 – С. 17 – 23.

31. Лях М.М. Аналіз та вдосконалення конструкції піногенеруючого устаткування / М.М. Лях, В.М. Савик, Н.В. Федоляк // Міжнародна науково - технічна конференція «Нафтогазова енергетика-2011 : матеріали конференції – Івано-Франківськ, 10-14 жовтня 2011 р. – С. 22.

32. Лях М.М. Особливості механізму піноутворення в піногенеруючих пристроях ежекторного типу / М.М. Лях, В.М. Савик, В.М.

Вакалюк, Н.В. Федоляк, Я.В. Солоничний // Науковий вісник ІФНТУНГ. – Івано-Франківськ, 2013. – №1. – С. 98 – 104.

33. Маєвський Б.Й. Прогнозування, пошук та розвідка родовищ вуглеводнів/Б.Й. Маєвський, О.Є. Лозинський, В.В. Гладун, П.М. Чепіль.- К.: Наукова думка, 2004. – 446 с.

34. Марухняк В.М. (2005). Геологотехнологічні проблеми розкриття горизонтів з аномально низькими пластовими тисками та гранулярними колекторами в Західному регіоні України. Мінеральні ресурси України. №1. 35-37.

35. Марухняк В.М. Геологотехнологічні проблеми розкриття горизонтів з аномально низькими пластовими тисками та гранулярними колекторами в Західному регіоні України / В.М. Марухняк // Мінеральні ресурси України.– 2005. - №1. –С. 35–37.

36. Математичне врахування коливань вібраційного сита блоку очистки промивальної рідини / В.М. Савик, М.І. Книш, Т.О. Суржко, Ю.П. Ілляшенко // Тези 76-ї наукової конференції професорів, викладачів, наукових працівників, аспірантів та студентів університету на базі Національного університету «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», (Полтава, у період з 13 травня по 24 травня 2024 року – Полтава: Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», 2024. С. 70–71.

37. Мачужак М.І. Особливості розробки Шебелинського ГКР / М.І. Мачужак, С.О. Паюк, В.І. Жмурков, С.В. Кривуля, Є.С. Бікман, В.В. Соболев, О.М. Щирба // Нафтогазова галузь України – 2017. – № 1. – С. 3 – 6.

38. Методичні вказівки до виконання практичних робіт із курсу «Монтаж бурового та нафтопромислового обладнання». Укладачі: Савик В.М., Молчанов П.О., Калюжний А.П., Суржко Т.О., Книш М.І. – Полтава: НУПП імені Юрія Кондратюка, 2021. – 43 с.

39. Мирошніченко Т.І. Комплексна технологія глушіння та освоєння свердловин з аномально-низьким пластовим тиском / Т.І. Мирошніченко, Д.Т. Мирошніченко // Питання розвитку газової промисловості України: зб. наук. праць.– Харків: УкрНДІгаз, 2005. – Вип. XXXIII. Т. 2 – С. 40 – 48.

40. Мирошніченко Т.І. Моделювання та дослідження процесів отримання піни високого тиску з аерованої суміші / Т.І. Мирошніченко, Д.Т. Мирошніченко // Питання розвитку газової промисловості України: зб. наук. праць.– Харків: УкрНДІгаз, 2005. – Вип. XXXIII. Т. 2 – С. 29 – 36.

41. Мирошніченко Т.І. Піногенератор для освоєння глибоких свердловин з аномально низьким пластовим тиском / Т.І. Мирошніченко, Б.Б. Синюк // Питання розвитку газової промисловості України: зб. наук. праць. – Харків: УкрНДІгаз, 2003. – Вип. XXXI. – С. 253 – 257.

42. Мислюк М. А., Зарубін Ю. О. Моделювання явищ і процесів у нафтогазопромисловій справі. Івано-Франківськ : Екор, 1999. 496 с.

43. Мислюк М. А., Рибчич І. Й., Яремійчук Р. С. Буріння свердловин. Київ : Інтерпрес, 2005. Т. 2 : Промивання свердловини. Відробка доліт. 304 с.

44. Мислюк М. А., Рибчич І. Й., Яремійчук Р. С. Буріння свердловин. К. : Інтерпрес ЛТД, 2002. Т. 5 : Ускладнення. Аварії. Екологія. 372 с.

45. Мислюк М. А., Салижин Ю. М. Система вибору оптимальних рецептур обробки бурових розчинів. *Нафтова і газова промисловість*. 2007. № 5. С. 25–28.

46. Мислюк М.А. До оцінки первинного розкриття горизонтів на родовищах України / М.А. Мислюк та ін. – *Нафтова і газова промисловість* – 2005 р. – №6.

47. Модернізація обладнання блоку очистки промивальної рідини / В.М. Савик, П.О. Молчанов, Петро Молчанов, Тетяна Суржко, Максим Книш // Тези Київський національний університет будівництва і архітектури кафедра машин і обладнання технологічних процесів III Міжнародна науково-практична

конференція «Енергоощадні машини і технології» 17 - 19 травня Київ 2022. С 74–77.

48. Молчанов П.О., Савик В.М., Ілляшенко Ю.П., Суржко Т.О., Книш М.І. (2022). удосконалення бурових насосів насосно-циркуляційного комплексу бурової установки. sur les matériaux de la iii conférence scientifique et pratique internationale «débats scientifiques et orientations prospectives du développement scientifique» 8 juillet 2022 • Paris, République Française, 151–155.

49. Мочернюк Д.Ю. Моделювання фізичних процесів на основі визначальних рівнянь / Д.Ю. Мочернюк – Нафтова і газова промисловість – 2001. – №3. – С. 12 – 14.

50. Нові технології в промисловій геофізиці / В. Андрущенко та ін. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка*. 2010. № 48. С. 35–39.

51. НПАОП 11.1-1.01-08. Правила безпеки в нафтогазодобувній промисловості України (41210).

52. Оптимізація конструкцій піногенераторів насосно-циркуляційної системи бурової установки / В.М. Савик, М.І. Книш, Т.О. Суржко // Тези 75-ї наукової конференції професорів, викладачів, наукових працівників, аспірантів та студентів університету на базі Національного університету «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», (Полтава, у період 01 травня по 26 травня 2023 року – Полтава: Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», 2023. С 101–102.

53. Очищення шлейфів свердловин від забруднень за допомогою пінних поршнів / В.С. Марінін, А.Я. Строгій, В.М. Гончаров, Л.О. Костенко. Питання розвитку газової промисловості України. 2007. Вип. XXXV. С. 141- 144.

54. Павличенко А.В., Коровяка Є.А., Ігнатов А.О., Давиденко О.М. Гідрогазодинамічні процеси при спорудженні та експлуатації свердловин. – Дніпро: Національний технічний університет "ДП", 2021. – 201 с.

55. Пат. 111893 України, МПК E21B 21/14 (2006.01), B01F 3/04 (2006.01). Піногенератор / Савик В.М., Лях М.М., Мамишов Н.К., Молчанов П.О.; заявник і власник Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка. – № у 2016 05132; заявл. 11.05.16; опубл. 25.11.16. Бюл. № 22 – 6с.

56. Пат. 42464 України, МПК (2009) F04F 1/00. Схема обв'язки циркуляційної системи при бурінні з промиванням свердловини піною / Савик В.М., Лях М.М., Тимошенко В.М., Лужаниця О.В., Педенко Ю.О., Серий В.О.; заявл. 30.12.2008; опубл. 10.07.2009. Бюл. № 13 – 6 с.

57. Патент №35717 Україна, МПК (2006.01) B01F 3/04, E02B 8/00. Піногенеруючий пристрій / Лях М.М., Савик В.М., Лужаниця О.В., Тимошенко В.М., Фурса Р.П., Вакалюк В.М.; заявл. 10.08.2006; опубл. 10.10.2008, Бюл. № 19 - 6 с.

58. Патент №77955 Україна, МПК (2013.01) B01F 3/04, E02B 8/00. Піногенеруючий пристрій багатосопловий / Савик В.М., Лях М.М., Михайлюк В.В.; заявл. 03.05.2012; опубл. 11.03.2013, Бюл. № 5 - 4 с.

59. Патент України № 104950, МПК E21B43/00. Пристрій для освоєння свердловин піною / Семеняка О.Г., Кушнар'ов С.І., Коцаба В.І., Кривуля С.В., Росляков В.О., Фесенко Ю.Л., Вахр'ів А.П., Клименко С.М., Когуч Д.М., Місін'ов О.О. Подання заявки 15.09.2015; Опубл 25.02.2016; Бюл № 4, патентовласник ПАТ “Укргазвидобування”.

60. Патент України № 17072, МПК E21B43/25. Піноутворюючий склад для освоєння свердловин / Іванків О.О., Писаренко А.А., Ковальова Н.В., Гординська О.В. Подання заявки 23.02.2006; Опубл 15.09.2006; Бюл № 9, патентовласник Полтавське відділення Українського державного геологорозвідувального інституту.

61. Патент України № 17819, МПК E21B43/25. Піноутворюючий склад для освоєння свердловин / Вечерік Л.В., Хаєцький Ю.Б., Шимко Р.Я., Фірман М.А., Стасів О.С., Іванків О.О., Дементій С.В. Подання заявки 12.04.2006; Опубл 16.10.2006; Бюл № 10, патентовласник ДК “Укртрансгаз”.

62. Патент України № 22632, МПК E21B43/00. Рідинно-газовий ежектор для освоєння свердловин / Петришак В.С., Марчук Я.С., Андрійшин М.П., Яцків М.П., Гордієнко О.М., Юськів Р.М. Подання заявки 06.12.2006; Опубл 25.04.2007; Бюл № 5, патентовласник Петришак В.С., Марчук Я.С., Андрійшин М.П., Яцків М.П., Гордієнко О.М., Юськів Р.М.

63. Патент України № 40206, МПК E21B43/11. Спосіб освоєння свердловин при аномально низьких пластових тисках з наступною експлуатацією без глушіння свердловини та пристрій для його здійснення / Яремійчук Р.С., Шандровський Т.Р., Лужаниця О.В., Якимечко Я.Я. Подання заявки 09.10.2000; Опубл 16.07.2001; Бюл №6, патентовласник Яремійчук Р.С., Шандровський Т.Р., Лужаниця О.В., Якимечко Я.Я.

64. Патент України № 43462, МПК E21B43/22. Піноутворюючий склад для обмеження припливу пластових вод і освоєння свердловини /ТОВ “Нові мікротехнології”. Подання заявки 27.10.1999; Опубл 17.12.2001; Бюл № 1, патентовласник ТОВ “Нові мікротехнології”.

65. Патент України № 54523, МПК E21F5/02. Піногенератор / Артемов В.І., Синюк Б.Б., Мирошніченко Т.І. Подання заявки 27.12.1999; Опубл 17.03.2003; Бюл №3, патентовласник ДК “Укргазвидобування”.

66. Патент України № 55531, С2 7B01F3/04. E02B8/08. Пристрій для насичення рідини газом / Романцов В.П., Доброногов В.Г., Булгаков О.Б., Булгаков Б.Б., - № 2000106011. Заявл. 24.10.2000. Опубл. 15.04.2003

67. Патент України № 56923, МПК E21B43/25. Піноутворюючий склад для освоєння свердловини /ТОВ “Українська торгівельна компанія”. Подання заявки 13.11.2002; Опубл 15.05.2003; Бюл № 5, патентовласник ТОВ “Українська торгівельна компанія”.

68. Патент України № 86468, МПК E21B43/00. Пристрій для освоєння свердловини / Купер І.М., Тарабарінов П.В., Примолений Ю.В. Подання заявки 04.06.2007; Опубл 27.04.2009; Бюл № 8, патентовласник ПАТ “Укрнафта”.

69. Пащенко, О. А. Шляхи підвищення надійності та ефективності бурового обладнання. In Форум гірників – 2016: матеріали міжнар. конф., м. Дніпропетровськ (pp. 5-6).

70. Підвищення ефективності піногенеруючих пристроїв для первинного розкриття продуктивних горизонтів з аномально-низькими пластовими тисками / М.М. Лях, В.М. Тимошенко, В.М. Савик, Т.М. Яцишин // Міжнародна науково – технічна конференція «Нафтогазова енергетика: проблеми та перспективи» : матеріали конференції – Івано-Франківськ, 20-23 жовтня 2009 р. – С. 73.

71. Підвищення продуктивності низькодебітних обводнених газових і газоконденсатних свердловин / Р.М. Кондрат, О.Р. Кондрат, Ю.В. Марчук, І.І. Хомин. Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. 2007. № 3 (24). С. 14-17.

72. Піногенератор для очистки та інгібування внутрішньої поверхні газопромислового обладнання і результати його промислових випробувань / В.В. Дячук, В.М. Гончаров, С.В. Чопань, Р.В. Бойко, О.І. Гончаров, Л.О. Костенко. Питання розвитку газової промисловості України. 2003. Вип. XXXI. С. 199-205.

73. Покращення характеристик бурових насосів / В.М. Савик, Ю.П. Ілляшенко, М.І. Книш // Тези II міжнародної науково-практичної конференції “Енергоощадні машини і технології”, 17-19 травня 2022 року – Київ: Київський національний університет будівництва і архітектури, 2022.

74. Раціональне конструювання та рекомендації щодо умов експлуатації обладнання циркуляційної системи бурової установки / Т.О. Суржко, П.О. Молчанов, В.М. Савик, М.І. Книш // Збірник наукових праць XIV Міжнародної науково-практичної конференції “Академічна й університетська наука: результати та перспективи”, 9 грудня 2021 року – Полтава: Полтавська політехніка 2021.

75. Розробка та впровадження комплексу технологічних заходів для закінчування свердловин в умовах гранулярних колекторів з АНПТ в

Західному регіоні та Криму. / Заключний звіт про науково-дослідну роботу за договором №16/03 з НАК "Надра України" – Полтава, 2003. – 175 с.

76. Савик В.М. (2012). Оцінка впливу геометричних параметрів на ефективність роботи піногенеруючого пристрою. Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, №2 (43), 173-188.

77. Савик В.М. (2013). Підвищення ефективності піногенеруючих пристроїв насосно-циркуляційних систем бурових установок: (кандидатська дисертація). Івано-Франківськ, 139 с.

78. Савик В.М. Оптимізація параметрів піногенеруючих пристроїв / В.М. Савик, М.М. Лях, В.М. Михайлюк // Геологія. Гірництво. Нафтогазова справа : науковий журнал. – Полтава : ПолтНТУ, 2012. – № 2. – С. 128 – 137.

79. Савик В.М. Циркуляційна система бурової установки з дослідженням роботи блока очищення БМ-ОБР / В.М. Савик, Д.С. Крамарь // Міжнародна науково-практична конференція «Проблеми та перспективи розвитку нафтогазового комплексу»: матеріали конференції – Полтава, 26-28 вересня 2012 р. – С. 12.

80. Савик В.М., Лях М.М., Вакалюк В.М., Солоничний Я.В. (2012). Аналіз і раціоналізація конструкції піногенеруючого устаткування або пристрою. Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, №3 (44). 63-69.

81. Сайт АТ "Укргазвидобування". URL: <http://ugv.com.ua>.

82. Сайт Міністерства енергетики України. URL: <http://mev.gov.ua>.

83. Сайт НАК "Нафтогаз України". URL: <http://www.naftogaz.com>.

84. Світлицький В. М., Кривуля С.В., Матвієнко А.М., Коцаба В.І. Машини та обладнання для видобування нафти і газу: Довідниковий посібник. Харків, КП «Міська друкарня», 2014. – 352 с.

85. Семеняка О.Г. Освоєння свердловин піною із застосуванням пристрою, розробленого УкрНДІгазом / О.Г. Семеняка, С.І. Кушнар'ов, В.О. Росляков, А.М. Шліхутка, Н.Б. Михайликова // Питання розвитку газової

промисловості України: зб. наук. праць.— Харків: УкрНДІгаз, 2017. — Вип. XLV. — С. 112 – 116.

86. Судаков А. К., Коровяка Є. А., Максимович О. В., Расцветаєв В. О., Дзюбик А. Р., Яворська В. В., Войтович А. А. Основи нафтогазової справи: підручник. – Дрогобич: «Посвіт», 2023. 599 с.

87. Суржко Т.О., Книш М.І., Ілляшенко Ю. П., Панюта В.Б. Конструювання обладнання циркуляційної системи бурової установки. XIII міжнародної науково-практичної конференції «Академічна й університетська наука», всеукраїнської науково-практичної конференції «Сучасні рецепції світоглядно-ціннісних орієнтирів Григорія Сковороди» 02 грудня 2022 року. Збірник наукових праць. Полтава 2022 Том 2. – с. 168–170.

88. Тарко Я. Б. Аналіз гідродинамічних методів впливу на привибійну зону пласта. *Розвідка і розробка нафтових і газових родовищ*. 2001. № 38. С. 128–133.

89. Транспортування водними шляхами блоків бурового обладнання / Василь Савик, Тетяна Суржко, Максим Книш, Юрій Ілляшенко // Всеукраїнська науково-практична конференція здобувачів вищої освіти та молодих учених «Логістичне управління та безпека руху на транспорті». Збірник наукових праць – Київ, 2024 С. 56–59

90. Упровадження ежекторних технологій для підвищення ефективності циркуляційної системи бурової установки / В.М. Савик, П.О. Молчанов, М.І. Книш // Тези 74-ї наукової конференції професорів, викладачів, наукових працівників, аспірантів та студентів університету на базі Національного університету «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», Том 2 (Полтава, Полтава, 25 квітня – 21 травня 2022 р.) – Полтава: Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», 2022. С 70–72.

91. Чудик І. І. Енергетичні витрати в процесі буріння свердловини / І. І. Чудик // Нафтогазова енергетика. – 2007. – №2(3). – С. 5-8.

92. Чудик І. І., Бабій Р. Б. Оптимальна подача промивальної рідини на вибій при бурінні свердловини. *Нафтогазова енергетика*. 2007. № 3(4). С. 71–75.

93. Шкіца Л.С. Дослідження забруднення атмосфери випарами бурового розчину / Л.С. Шкіца, Т.М. Яцишин // III Всеукраїнський з'їзд екологів з міжнародною участю : збірник наукових статей. Том 2. – Вінниця : 2011 – С. 554 – 557.

94. Щодо пінної технології очищення та інгібування газопромислового і газотранспортного обладнання / В.М. Гончаров, А.П. Мельник, Л.О. Костенко, О.А. Дегтярьов, М.В. Гончаров. Питання розвитку газової промисловості України. 2010. Вип. XXXVIII. С. 179-184.

95. Яремійчук Р.С., Яремійчук Я.С. Освоєння свердловин: Довідникове видання. – Львів: Центр Європи, 2007. – 368 с.

96. Яремійчук Р.С. Освоєння та дослідження свердловин / Р.С. Яремійчук, В.Р. Возний // – Львів. 1994. – 440 с.

97. Яцишин Т.М. Дослідження впливу основних технологічних операцій процесу буріння нафтогазових свердловин на атмосферне повітря / Т.М. Яцишин, В.М. Савик // Інститут проблем моделювання в енергетиці : збірник наукових праць – Київ, 2012. – Вип. 62. – С. 54 – 59.

98. Austin E.H. Drilling engineering handbook. Springer Science & Business Media, 2012. 300 p.

99. Australian Drilling Industry Training Committee Ltd. (Hrsg.): Drilling: The Manual of Methods, Applications and Management. 4th Edition, 1996, ISBN 1-56670-242-9.

100. Aziukovskyi, O., Koroviaka, Y., & Ihnatov, A. (2023). Drilling and operation of oil and gas wells in difficult conditions.

101. Bennion D.B. Underbalanced operations offer pluses and minuses / D.B. Bennion // Oil and Gas J. – 1996, 1 – Vol. 94, № 1 – P. 33 – 40.

102. Bourgoyne A.T., Millheim, K.K., Chenevert, M.E., Young, F.S. Applied Drilling Engineering. Society of Petroleum Engineers, 2014. 1707 p.

103. Boyun G., William C.L., Ali Ghalambor B.G. (2007). Petroleum Production Engineering. Gulf Professional Publishing, P. 312.

104. Determining foaming regularities enabled by a five-nozzle foam generator for drilling technologies under conditions of abnormally low pressures / A. Kaliuzhnyi, P. Molchanov, V. Savyk, M. Knysh, R. Yaremiychuk Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2022. Vol. 4, no. 1 (118). P. 72–79.

105. Golin B. Murch Underbalanced: An integrated approach / B. Golin // Drilling Contractor, 1998 – juli / august. – P. 52 – 55.

106. Krot, A. Analytical Modeling of Oscillations of Movable Operating Elements of a Roll-Drum Activator / A. Krot, A. Ruchka, A. Savchenko, O. Krot, D. Supryaga // International Journal of Engineering & Technology, 2018, Vol 7 (4.3). – P. 58-63.

107. Lyakh M.M., Savyk V.M., Molchanov P.O. (2016). Improving the efficiency of foamgenerating devices of pump-circulative systems of drilling sets. Розробка родовищ корисних копалин. – Дніпропетровськ: Науковий вісник НГУ, № 3. 23-30.

108. Maksym Knysh, Tetiana Surzhko, Research of the equipment of the washing liquid purification unit with analysis of the energy efficiency of foam generators in conditions of variable pressure and liquid flow, Integrated Technologies and Energy Saving 2'2025, Kharkiv, 2025, pp. 3–13.

109. Mathematical and computer identification of the characteristics of oscillation frequency and deformations of the equipment element in the flush purification unit / T. Surzhko, P. Molchanov, S. Hudz, M. Knysh, Y. Sribna, L. Hrytsenko, V. Tytarenko, V. Savyk, V. Rubel Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2024. Vol. 4, no. 7 (130). P. 32–40.

110. Mitchell R.F., Miska S.Z. Fundamentals of Drilling Engineering (Spe Textbook Series). Society of Petroleum Engineers, 2010. 696 p.

111. Molchanov, P., Surzhko, T., Knysh, M., Sribna, Y., Savyk, V., Novopysmennyi, S., Debre, O., Salenko, Y., Hudz, S., Zakomirnyi, D. (2025). Mathematical and graphical approaches to improve the process of saturation of flushing fluid with air in the circulation system of a drilling rig unit. *Technology Audit and Production Reserves*, 3 (1 (83)), 00–00. <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2025.329744>

112. Nesterenko, M., Nazarenko, I., & Molchanov, P. (2018). Cassette installation with active working body in the separating partition. *International Journal of Engineering and Technology (UAE)*, 7(3), 265–268. doi:10.14419/ijet.v7i3.2.14417

113. Piwniak, G. Diagnostika urządzeń wiertniczych [Text] / G. Piwniak, L. Mieszczerekow, N. Dudla. – Kraków : Wyd. Lettra-Graphic, 2004. – 174 s.

114. Rivin E.I. (2003). *Passive vibration isolation*. New York: ASME Press

115. Ron Baker: *A Primer of Oilwell Drilling: A basic Text of Oil and Gas Drilling*. 6th edition, University of Texas, Austin 2001, ISBN 0-88698- 194-8.

116. Shendrik O. (2019). Energy-saving intensification of gas-condensate field production in the east of Ukraine using foaming reagents / O. Shendrik, M. Fyk, V. Biletskyi, S. Kryvulia, D. Donskyi, A. Alajmeen, A. Pokhylko // *Mining of Mineral Deposits*. – 2019. – Vol. 13. – № 2. – P. 82–90.

117. Sivko V.Ya. (1998), Motion of a dynamic system taking into account the internal resistance of the medium / V.Ya. Sivko, E.O. Scubok // *Periodical collection of scientific works "Vibrotechnology - 98"*. Treatment of dispersed materials and media. Theory, research. Technology and equipment. - K.: NGO VOTUM,. - P. 16 - 21.

118. Squires K., Eaton j. Particle response and turbulence modification in isotropic turbulence. *Phys. Fluid*. 1990. Vol. 2. № 7. P. 1191-1203.

119. Tetiana Surzhko, Maksym Knysh, Yuriy Kuzub, Oleksandr Kruchkov, Viacheslav Rubel study of the operating parameters of vibrations of a vibrosieve of

the washing liquid purification unit Technology Audit and production Reserves – № 4/1(72), Kharkiv, 2023 pp. 34–39.

120. Tuna E. Foam characterization effects of bubble size and texture. Degree thesis, of Master of Science in Petroleum and Natural Gas Engineering. 2004. DOI: 10.13140/RG.2.2.24491.69920.

121. Walker M. Hopemann Underbalanced completion improve well softy and productivity / M. Walker // World Oil – 1995 – Vol. 216 – № 11.

122. William Lyons. Working Guide to Drilling Equipment and Operations. Imprint: Gulf Professional Publishing. Published Date: 1st October 2009. Page. 352. Paperback ISBN: 9781856178433. eBook

123. Xia G.D., Chai L. Influence of surfactant on two phase flow regime and pressure drop in upward inclined pipes. Journal of Hydrodynamics. 2012. Vol 24 (1). P. 39-49.

Додатки

Додаток А

(Програма і методика промислових випробувань
удосконаленого піногенератора циркуляційної системи
бурової установки)

Додаток Б

(АКТ промислових випробувань на свердловині №1
Майорівської площі удосконаленого піногенератора
циркуляційної системи бурової установки)

Додаток В

(АКТ про впровадження результатів дисертаційної роботи у навчальний процес Національного університету «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»)

Додаток Г

(ДОВІДКА про впровадження дисертаційного дослідження
ТОВ «НАФТОПРОМИСЛОВА ГЕОЛОГІЯ»)