

УДК 622.24.063

**В.С. БІЛЕЦЬКИЙ**, д-р техн. наук,

**М.В. ТКАЧЕНКО**

(Україна, Полтава, Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка)

## **ЗБАГАЧУВАЛЬНА ТЕХНІКА ТА ТЕХНОЛОГІЇ ПРИ ПРИГОТУВАННІ Й РЕГЕНЕРАЦІЇ БУРОВИХ РОЗЧИНІВ**

*Вступ. Постановка проблеми.* Збагачення корисних копалин як сукупність процесів первинної обробки мінеральної сировини, що мають на меті відділення цінних мінералів від порожньої породи, а також взаємне розділення цінних мінералів, тісно переплітається з рядом інших галузей і підгалузей промисловості. Зокрема, техніка і технології збагачення корисних копалин широко застосовуються в будівельній справі, при брикетуванні, грудкуванні (агломерація, брикетування, грануляція). Розгляд і аналіз техніки і технологій суміжних галузей, особливостей застосування в них процесів і апаратів збагачення корисних копалин має як наукове значення (синергетичний ефект від міжгалузевих контактів), так і прикладне значення (розробка, виготовлення і впровадження нових апаратів і обладнання для специфічних умов і задач експлуатації).

Операції дроблення і подрібнення, змішування компонент, розділення твердого дисперсного матеріалу за крупністю, відділення піскової фракції, центрифугування – типові не тільки при класичному збагаченні корисних копалин, але і при *бурінні свердловин* – при підготовці та регенерації бурових розчинів. При цьому фахівці у гірництві (збагачення корисних копалин) і нафтогазовій інженерії, бурінні свердловин часто стикаються з ідентичними технічними проблемами, пошук ефективних технологічних рішень протікає паралельно (відокремлено), що звужує можливості для інформаційного обміну, міжгалузевої співпраці.

Промивання свердловини – це один з найбільш важливих технологічних процесів у бурінні, що включає різні технологічні операції:

- приготування промивної рідини (бурового розчину);
- якісне очищення (регенерація);
- регулювання технологічних параметрів, властивостей [1].

Успішне, якісне та безаварійне будівництво свердловин у першу чергу визначається досконалістю процесу промивання і застосовуваного при цьому устаткування.

Аналіз техніко-економічних показників підтверджує той факт, що навіть з використанням високоефективного бурового устаткування ці показники не завжди є високими. Застосування сучасного бурового устаткування дозволяє досягти максимальних техніко-економічних показників тільки при високих технологічних властивостях бурових розчинів (БР), що забезпечується вдосконаленням технології промивання.

## **Загальні питання технологій збагачення**

---

Узагальнення світового досвіду сприяє оснащенню вітчизняних бурових установок високоефективним устаткуванням для приготування розчину та його багатоступеневого очищення на сучасному рівні.

*Аналіз останніх джерел досліджень і публікацій.* Дослідженню устаткування та процесів приготування та очищення бурових розчинів і пов'язаних з ними явищ приділяли увагу багато вітчизняних та зарубіжних інженерів і вчених. Серед них А.І. Булатов, Ю.М. Проселков, П.П. Макаренко, В.І. Міщенко, А.В. Кортунов, В.М. Мільштейн, С. Баумгартен (С. Baumgarten), Д.О. Робертсон (J.O. Robertson), Т.Е. Аллен (T.E. Allen), П.О. Паджетт (P.O. Padgett). Результати їх досліджень опубліковані в ряді статей і узагальнювальних монографій, у яких розглянуті основні питання приготування й регенерації бурових розчинів [1-14].

*Виділення не розв'язаних раніше частин загальної проблеми.* Очищенню та приготуванню бурових розчинів приділяють особливу увагу, оскільки вибурена порода, що надходить у буровий розчин, негативно впливає на його основні технологічні властивості, а отже, і на техніко-економічні показники буріння свердловин, зокрема на вартість свердловини через швидкість проходки, гідравліку, об'єми розбавлення для підтримки густини, коефіцієнт тертя бурильного інструмента, диференціальні прихвати, втрату циркуляції, сальнікоутворення на компоновці низу бурильної колони (КНБК), знос бурового устаткування й інструмента тощо. Крім того, при накопиченні шламу в буровій промивній рідині істотно знижується її глинізуюча здатність, що приводить до зміни структури товстої пухкої кірки на стінках свердловини в зонах фільтрації (ця кірка стає більш пухкою і проникною). За рахунок підвищення густини промивної рідини, а значить і сумарної ваги стовпа бурового розчину у свердловині значно зростає вірогідність його поглинання. Витрати на очищення та приготування бурового розчину, а також розв'язання проблем, пов'язаних з підвищеним умістом твердої фази, складають значну частину загальних витрат на буріння свердловин [2]. Усе це приводить до зниження надійності обладнання, зменшення швидкості буріння та економічних втрат.

Разом з тим, специфіка технічних і технологічних задач, які стоять при підготовці та регенерації бурового розчину і які виконуються практично повністю на збагачувальному обладнанні не знаходяться в полі зору профільних фахівців зі збагачення корисних копалин.

*Мета роботи* – огляд і аналіз сучасних конструкцій устаткування для приготування та регенерації бурового розчину, що обумовлює вибір найбільш прийняттого варіанта комплектуючого обладнання при оснащенні нових та існуючих циркуляційних систем бурових установок. Для досягнення цієї мети також ставиться *задача* ознайомлення фахівців-збагачувальників зі специфікою, техніко-технологічними особливостями використання збагачувальних технологій і обладнання при бурінні свердловин.

*Основний матеріал і результати.* Промивання свердловини включає приготування промивної рідини (ПР), її використання в бурінні, вихід на поверхню

незбагаченої рідини, що несе вибурену породу (шлам), її очищення (знешламлення) та оброблення й отримання нової збагаченої рідини готової до подальшого використання. На рисунку 1 представлена принципова схема промивання свердловини.

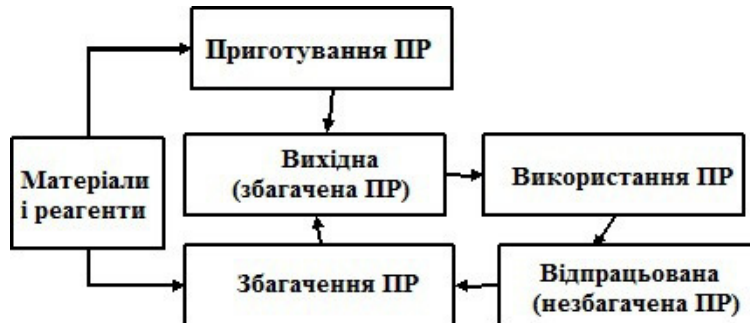


Рис. 1. Принципова схема процесу промивки свердловини

Систематичне збагачення бурового розчину в процесі проходження свердловини здійснюється за допомогою спеціального технологічного обладнання (циркуляційної системи) і представлено рядом взаємопов'язаних систем: приготування й обробки бурового розчину, регенерації, очищення його від шламу та газу, циркуляції. Як правило, циркуляційна система включає: декілька резервуарів і декілька резервних ємкостей для бурового розчину та для хімічних реактивів, систему жолобів, механічні засоби очищення розчину від шламу (грохот, блок гідроциклонів, осадову центрифугу), дегазатори, один або декілька бурових насосів і трубопровід високого тиску. Основні елементи циркуляційної системи представлені на рисунку 2.

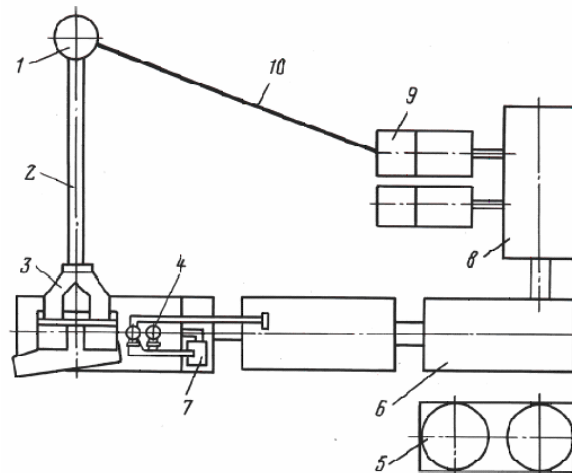


Рис. 2. Схема поверхневої циркуляційної системи:

- 1 – гирло свердловини; 2 – жолоби; 3 – вібросито (грохот); 4 – гідроциклон;
- 5 – блок приготування розчину; 6 – ємкість; 7 – шламний насос;
- 8 – приймальна ємкість; 9 – буровий насос; 10 – нагнітальний трубопровід

## **Загальні питання технологій збагачення**

### *Приготування бурових промивних рідин*

Приготування бурових розчинів – це технологія отримання промивної рідини з певними реологічними властивостями, густиною в результаті дроблення і подрібнення вихідних матеріалів і взаємодії компонентів (глинопорошку, реагентів). Мета процесу приготування – забезпечення необхідних початкових властивостей бурового розчину, від яких залежать його стабільність та реалізація технологічних функцій: вимивання вибуреного шламу, винесення його від грудей вибою на поверхню, охолодження бурового інструменту, створення гідростатичного тиску для компенсації пластового тиску і унеможливлення нафтогазопроявів.

Бурові промивні рідини можуть готуватися безпосередньо на буровій установці в польових умовах за допомогою спеціальних технічних засобів або централізовано на глинозаводі. Бурові промивні рідини готуються в спеціальних пристроях – розчино– або глиномішалках механічної або гідравлічної дії. Використовують різні конструкції механічних розчино– або глиномішалок: лопатеві, роторні, кульові; за характером дії – циклічної та безперервної дії; за розташуванням валів – горизонтальні та вертикальні. Механічні лопатеві одно– і двовальні розчино– та глиномішалки (рисунок 3) мають порівняно невисоку продуктивність (до 6 м<sup>3</sup>/год при використанні глинопорошків).

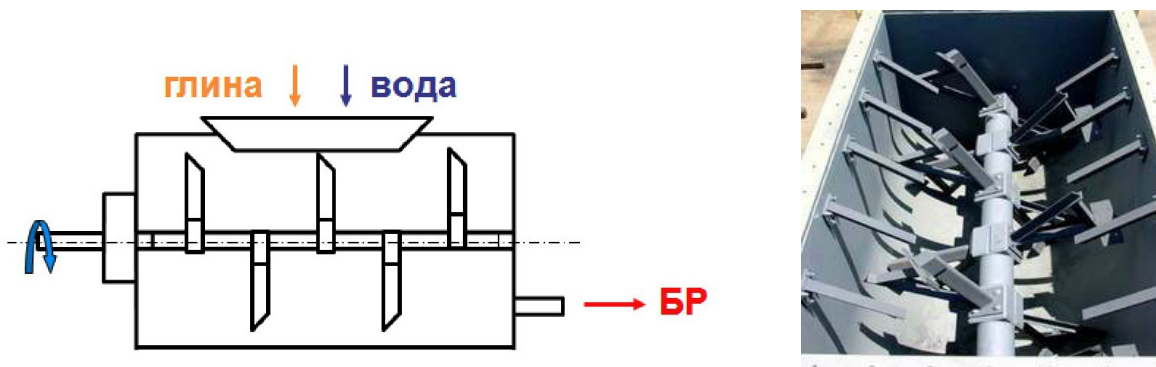


Рис. 3. Механічна мішалки лопатевого типу (БР – буровий розчин)

Одним із розповсюджених різновидів механічних глиномішалок є фрезерно-струменеві млини (ФСМ) (рисунок 4) призначені для приготування і обважнення промивних розчинів. ФСМ – машини безперервної дії, використовуються для приготування промивних рідин з грудкових глин і глинопорошків. Вони характеризуються порівняно високою продуктивністю (до 20 м<sup>3</sup>/год) як по грудкових глинах, так і по глинопорошку; простота конструкції та невеликі габарити; висока економічність. Недоліком є низька якість розчину.



Рис. 4. Фрезерно-струменевий млин:  
1 – бункер; 2 – ротор; 3 – диспергуюча рифлена плита;  
4 – вихідна решітка

При розвідувальному бурінні нафтових і газових свердловин в умовах автономного розташування бурових важливе значення має гідравлічний спосіб приготування глинистих промивальних рідин, при якому для руйнування частини твердої фази використовується тільки кінетична енергія струменя. Пристрої для гідравлічного способу приготування глинистих промивальних рідин в нафтогазовій інженерії отримали назву гідравлічних змішувачів або гідромішалок. Розрізняють гідромоніторні й ежекторні гідрозмішувачі.

Різновиди гідромоніторних глиномішалок (ГСТ, ГВФТ, Папіровського, Рєзніченко та ін.) використовуються при бурінні глибоких свердловин. Продуктивність таких гідромішалок 40-120 м<sup>3</sup>/год, тиск рідини перед гідромоніторними насадками 4-10 МПа. В процесі приготування суспензії (пульпа) кілька разів циркулює в байпасному режимі по замкнутому циклу буровий насос – змішувач – запасний резервуар – буровий насос до повного диспергування твердої фази, оскільки за один цикл не можна отримати високоякісну глинисту промивальну рідину.

Безперервна робота ФСМ може бути забезпечена тільки за наявності механізованого завантаження початкових матеріалів.

Мішалки гідравлічні ежекторного типу (гідроворонки) використовуються для приготування промивальної рідини з глинопорошку. Це – пристрій безперервної дії. Принцип дії мішалки ежекторного типу (рисунок 5): в результаті витікання води (розчину хімічних реагентів) з сопла з високою швидкістю в приймальній камері створюється вакуум, завдяки чому в неї з воронки засмоктується глинопорошок (обважнювач). Сьогодні найбільше розповсюдження отримала гідравлічна мішалка типу МГ.

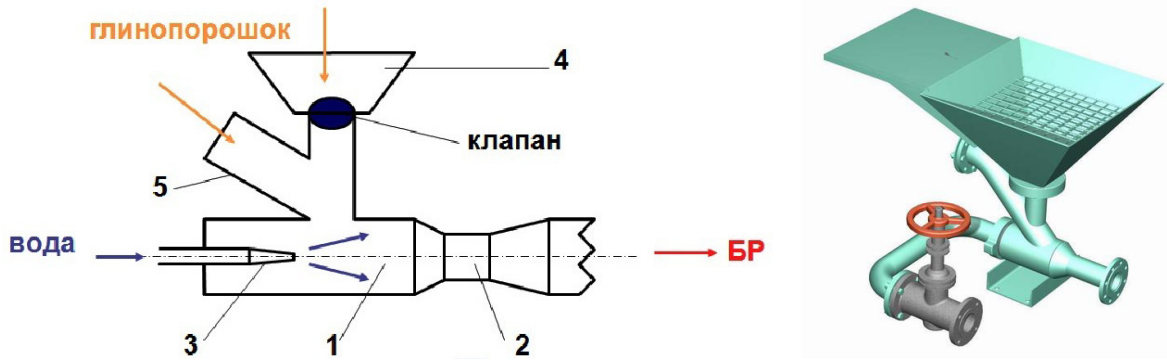


Рис. 5. Гідравлічна мішалка ежекторного типу:  
1 – приймальна камера; 2 – змішувальна камера; 3 – змінний штуцер (сопло);  
4 – завантажувальна воронка; 5 – лінії підводу глинопорошку (обважнювача)

Маючи відносно невеликі масу та габарити, гідроворонки відрізняються високою продуктивністю ( $70 \dots 90 \text{ м}^3/\text{год}$  при безперервній механізованій подачі глинопорошку).

Якість глинистої промивальної рідини, приготованої в гідроворонках, досить низька. Незважаючи на тонке мливо, частинки глинопорошку в процесі перемішування з водою повинні пройти подальше диспергування [2].

Гідравлічний диспергатор працює на принципі зіткнення двох струменів (аналогічно струминному млину). При зіткненні в камері обмеженого об'єму двох високошвидкісних струменів виникають явища кавітації. Для інтенсифікації диспергування застосовують ультразвук й інші ефекти.

Істотне підвищення ефективності перемішування в гідроворонках також може бути досягнуто при значному збільшенні числа Рейнольдса в робочій зоні змішування, що можливо при переході від компактного струменя до диспергованого. Тому перспективним напрямом подальшого вдосконалення системи приготування бурового розчину є, на нашу думку, розроблення гідроежекторного змішувача з диспергованим струменем (багатоствольне сопло). Зауважимо, що одним з визначальних параметрів процесу змішування в цих апаратах є число Вебера [6].

Застосовують також глиномішалки вихрового типу (перемішування здійснюється за принципом дії пральної машини) (рисунок б); комбінованого типу (суміщені процеси попередньої пластичної деформації, подрібнення глини та перемішування її з рідиною) та ін.

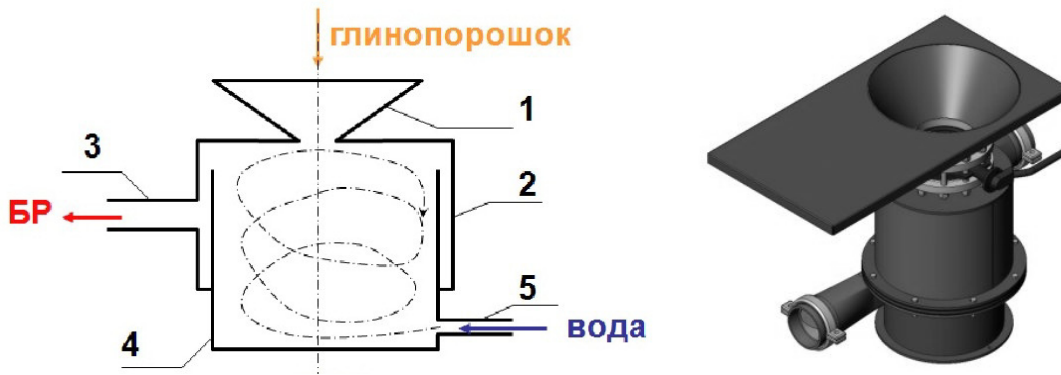


Рис. 6. Гідралічна мішалка вихрового типу:

1 – приймальна камера; 2 – змішувальна камера; 3 – змінний штуцер (сопло);  
4 – завантажувальна воронка; 5 – лінії підводу глинопорошку (обважнювача)

Окрім пристроїв, призначених для приготування бурового розчину (змішувачі), приймальні ємкості наземної циркуляційної системи бурової установки оснащуються ще і перемішувачами, які теж поділяються на механічні та гідралічні.

Механічні перемішувачі, як правило, складаються з електродвигуна, редуктора, валу та перемішуючого органу пропелерного (ПМ) або турбінно-пропелерного типу (ПЛ), який розташовується ближче до дна приймальної (як правило, чотирикутної) ємкості. Однак, ця конструкція активно модернізується. Зокрема, перспективнішими є багатоімпелерні мішалки типу "Турботрон" з круглим резервуаром [15], що не мають "мертвих зон" і забезпечують активну гомогенізацію пульпи по всьому робочому простору. Також з метою покращення характеристик бурового розчину можуть бути застосовані статичні змішувачі [16]. Результативним інструментом для оптимізації конструкції мішалок різних типів є моделювання і візуалізація потоків пульпи [17].

Дія гідралічних перемішувачів заснована на використанні кінетичної енергії струменя бурової рідини, що виходить з насадки з високою швидкістю.

Розрізняють керовані і некеровані гідралічні перемішувачі.

Керовані являють собою пожежний стовбур з рукояткою, поворотом якої можна направити струмінь БР в будь-яку зону приймальної ємкості (типу 4УПГ, ПГ). Некеровані гідралічні перемішувачі працюють за принципом сегнерового колеса, тобто самообертівими (типу ПГС).

#### *Очищення бурових розчинів*

У результаті руйнування гірських порід на вибої свердловини циркулюючий в ній буровий розчин безперервно збагачується шламом, що приводить до зростання густини, в'язкості та статичного напруження зсуву бурового розчину, що призводить до негативних наслідків:

- зниження механічної швидкості буріння і проходження на долото;
- зниження ресурсу роботи гідралічного устаткування (бурових насосів, вертлюгів);
- збільшення вірогідності виникнення різного роду ускладнень, аварій та ін.

## Загальні питання технологій збагачення

Для забезпечення нормальних умов буріння необхідно, щоб в очисній системі від промивальної рідини відбиралася така ж кількість гірської породи, яка в неї надходить в процесі циркуляції в свердловині.

Методи очищення промивальної рідини від шламу можна класифікувати таким чином: природні (жолобна система та відстійники); примусові – механічні (вібросита-грохоти) та гідравлічні (фугування в гідроциклонах і центрифугах); фізико-хімічні (введення флокулянтів і розчинників); комбіновані (поєднання методів). Технологічні можливості різних методів за глибиною очищення бурового розчину від вибуреної породи показано на рисунку 7.

Ефективне очищення БР можливе тільки при штучному прискоренні осідання шламу, що найлегше досягається при вібраціях або за рахунок відцентрових сил.

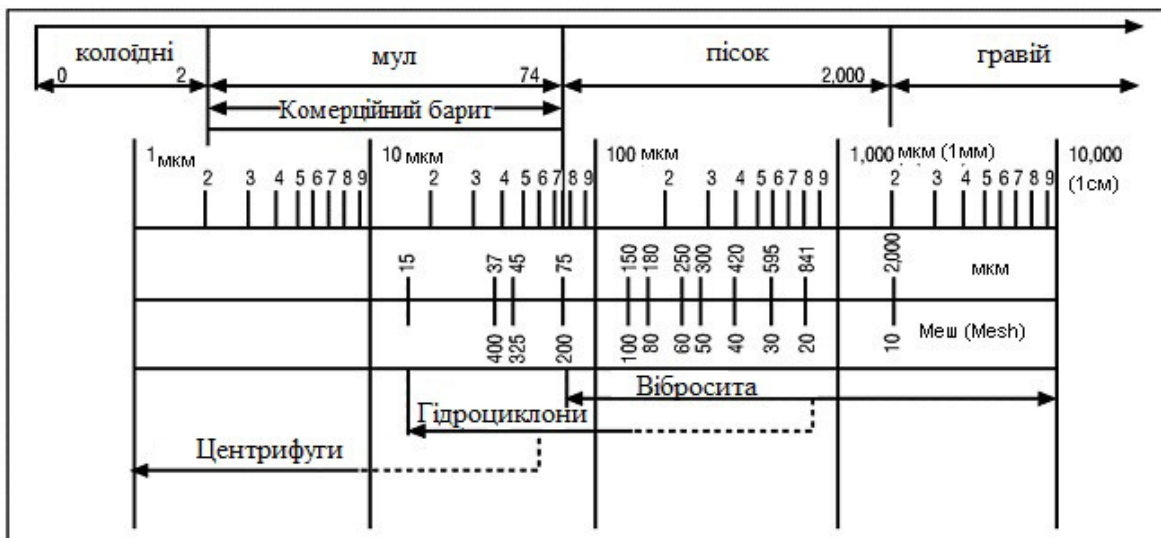


Рис. 7. Класифікація техніки для очищення бурового розчину залежно від розміру видаляємих твердих частинок [2]

Обов'язковим елементом циркуляційної системи бурового розчину, як в нашій країні, так і за кордоном є вібросита (рисунок 8). До кінця 1990-х рр. на нафтогазовидобувних об'єктах України найчастіше застосовувалися вібросита виробництва Росії типу: СВ-2, СВ-2Б, ВС-1. Сьогодні все більше застосування знаходять вібросита й очисні системи імпортного ("Swaco" та ін.) або сумісного (російсько-американське – "Ucom") виробництва. Вони відрізняються високими якістю виготовлення і глибиною очищення. При цьому застосовуються колові, еліптичні та лінійні типи вібрацій. Вібросита з коловим рухом розвивають низькі гравітаційні сили та володіють найбільшою транспортуючою здатністю, що сприяє кращому видаленню глинистих порід на верхніх інтервалах, зменшуючи їх дію на поверхню сітки, в той же час вони володіють низькою осушувальною здатністю. Вібросита з еліптичним рухом розвивають підвищені гравітаційні сили в порівнянні з коловими і володіють меншою транспортуючою



здатністю в порівнянні з коловими й лінійними типами. Вібросита з лінійним рухом найбільш універсальні, вони забезпечують підвищені гравітаційні сили, і відносно високу транспортуючу здатність, залежну від кута нахилу рами та положення вібраторів.



Рис. 8. Вібросита:  
ліворуч – буровий розчин на робочій поверхні вібросита (віброгрохота),  
гнідинцівське нафтогазоконденсатне родовище;  
праворуч – вібросито, виставка "Нафта і газ-2015"

Для очищення бурового розчину від тонкодисперсного шламу використовують гідроциклони (рисунок 9), які розділяють пульпу по зерну  $\geq 0,03$  мм.

Залежно від мінімального розміру частинок, що видаляються, гідроциклони в буровій техніці підрозділяють на: пісковідділювачі (0,08...0,09 мм) і муловідділювачі (0,03...0,05 мм).

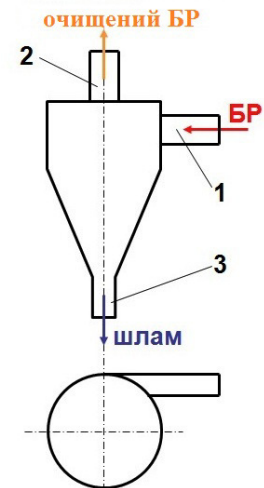


Рис. 9. Гідроциклони і батарея гідроциклонів для очищення бурового розчину:  
1 – патрубок подачі вихідної пульпи; 2 – зливний патрубок;  
3 – пісковий патрубок

## **Загальні питання технологій збагачення**

У практиці буріння свердловин застосовують одночасно по декілька гідроциклонів, об'єднаних у батареї. З конструкцій закордонного виробництва найбільш поширені в Україні російські піско- і муловідділювачі типу ПГ та ИМ, а також фірми "Swaco" та російсько-американського спільного підприємства "ИСОТ".

Для ефективного очищення БР необхідно послідовно використовувати віброрито (ВС) → пісковідділювач (ПГ) → муловідділювач (ИГ), тобто так звану триступінчасту систему очищення, що забезпечує видалення з БР більше 60 % вибуреної породи.

За кордоном значну економію засобів, особливо при використанні дорогих БР отримують за рахунок застосування чотириступінчастої системи очищення. Четвертим ступенем в цій системі є центрифуга. Із всіх відомих очисних пристроїв саме осадкові центрифуги забезпечують найбільшу ступінь очищення БР від шлам (мінімальний розмір частинок, що видаляються, 0,01...0,002 мм).

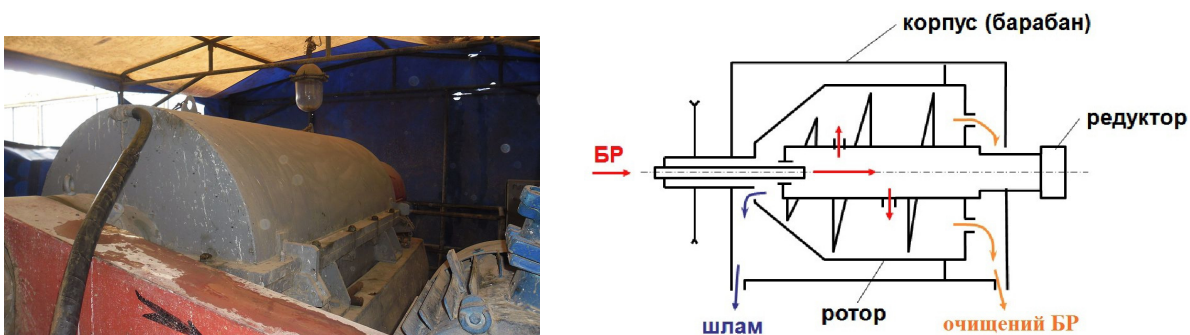


Рис. 10. Осаджувальна центрифуга:  
ліворуч – обробка бурового розчину на відсаджувальній центрифугі,  
Гнідинцівське нафтогазоконденсатне родовище;  
праворуч – схема очистки бурового розчину на осаджувальній центрифугі

З конструкцій вітчизняного виробництва найбільше поширення для очистки бурового розчину в Україні набули центрифуги ОГШ науково-виробничого підприємства "Екомаш" (м. Харків). У практиці експлуатаційного буріння встановлюються центрифуги ОГШ502К-11 і ОГШ501У-01. Сьогодні ще знаходяться в експлуатації центрифуги ОГШ501У-01, випущені 12-15 років тому. Для малолітражного буріння, наприклад при зарізці бокових стволів, використовують центрифуги цього ж типу марки ОГШ352К-06 або ОГШ352К-04 з внутрішнім діаметром ротора 350 мм. Є позитивний досвід застосування навіть невеликих центрифуг ОГШ321 з діаметром ротора 320 мм [18].

З імпортних центрифуг застосовуються моделі фірм "Mi SWACO", "Кемтрон", "Деррік", "Альфа-Лаваль" і ін. При цьому діаметр ротора майже у всіх 350-360 мм.

### *Висновки*

1. Виконано огляд сучасних конструкцій устаткування для підготовки та

регенерації бурового розчину. Показано, що операції дроблення і подрібнення, змішування компонент, розділення твердого дисперсного матеріалу за крупністю, відділення піскової фракції, центрифугування – типові не тільки при класичному збагаченні корисних копалин, але і при бурінні свердловин – при підготовці та регенерації бурових розчинів. Наведена коротка характеристика, класифікація, області та особливості застосування, переваги і недоліки обладнання циркуляційної системи бурового розчину.

2. За період 1990-2015 рр. відбулося переоснащення циркуляційних систем (ЦС) бурового розчину новим сучасним устаткуванням, що забезпечує вирішення технологічних і екологічних проблем в області промивання свердловин. Спостерігається тенденція закупівлі буровими компаніями дешевших виробів вітчизняного виробництва.

Бурові підприємства в Україні при будівництві свердловин перевагу надають устаткуванню очищення та приготування бурових розчинів компанії M-I Swaco. Успішно конкурують на цьому ринку українські компанії, зокрема, Харківське НТП "Екомаш".

3. Специфіка технічних і технологічних задач, які стоять при підготовці та регенерації бурового розчину і які виконуються практично повністю на збагачувальному обладнанні не знаходяться в полі зору профільних фахівців зі збагачення корисних копалин. Виконаний огляд і аналіз має на меті розвиток міжгалузевих контактів, які можуть дати синергетичний ефект для подальшого вдосконалення техніки і технологій в цій галузі.

### **Список літератури**

1. Булатов А.И., Макаренко П.П., Проселков Ю.М. Справочник по промывке скважин. – М.: Недра, 1984. – 317 с.
2. Булатов А.И., Демихов В.И., Макаренко П.П. Контроль процессов бурения нефтяных и газовых скважин. – М.: ОАО "Изд-во "Недра", 1999. – 424 с.
3. Мильштейн В.М. Крепление скважин в различных условиях бурения. – Краснодар: ООО "Просвещение-Юг", 2007. – 130 с.
4. Мильштейн В.М. Цементирование буровых скважин. – Краснодар: ООО "Просвещение-Юг", 2003. – 375 с.
5. Мищенко В.И., КОРТУНОВ А.В. Приготовление, очистка и дегазация буровых растворов. – Краснодар: АртПресс, 2008. – 336 с.
6. Мищенко С.В. Модернизация оборудования и совершенствование технологии приготовления тампонажных растворов: автореф. дис. на соискание научн. степени канд. техн. наук: спец. 05.02.13 – машины, агрегаты и процессы. – Краснодар, 2015. – 22 с.
7. Системы очистки буровых растворов. MI-SWACO, 2007.
8. Цегельский В.Г. Двухфазные струйные аппараты. – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2003. – 408 с.
9. Baumgarten C. Mixture Formation in Internal Combustion Engines. – Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2006. – 294 p.
10. Robertson J.O., Chilingarian G.V., Kumar S. Surface operations in petroleum production. – New York: Elsevier Science, 1989. – 562 p.
11. Mills D., Jones M.G., Agarwal V.K. Handbook of Pneumatic Conveying Engineering. – Marcel Dekker Inc., Basel, 2004. – 676 p.

## **Загальні питання технологій збагачення**

12. Pneumatic conveying of solids. A theoretical and practical approach / Klinzing G.E., Rizk F., Marcus R., Leung L.S. – Springer Dordrecht, Heidelberg, London, New York, 2010. – 561 p.

13. Pump Handbook / Edited by I. J. Karassik, J. P. Messina, P. Cooper, C. C. Heald. – 3-rd Edition. – New York : McGRAW-HILL, 2001. – 1768 p.

14. Surface operations in petroleum production / J.O. Robertson, G.V. Chilingarian, S. Kumar. – New York : Elsevier Science, 1989. – 562 p.

15. Патент на корисну модель 109125 Україна, МПК В01F 7/18 (2006.01). Лопатева мішалка / В.С. Білецький, Ю.С. Міщук; заявник і власник Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка. – №u201601985 заявл. 29.02.2016, опубл. 10.08.2016. – Бюл. № 15.

16. Білецький В.С., Сургова Н.В. Застосування статичних змішувачів для селективної агрегації тонкодисперсного вугілля // Вісті Донецького гірничого інституту. – 2011. – № 2(30). – С. 56-59.

17. Andre Bakker LaRoche. Modeling of the Turbulent Flow in HEV Static Mixers [Електронний ресурс]. – Електрон. дані (1 файл). – [18 с.]. – Режим доступу: <http://www.bakker.org/cfmbook/turbhev.pdf>.

18. Мищенко В.И., Добик А.А. Выбор центрифуг для очистки буровых растворов // Бурение и нефть. – 2015. – № 5. – С.38-40.

© Білецький В.С., Ткаченко М.В., 2017

*Надійшла до редколегії 19.01.2017 р.*

*Рекомендовано до публікації д.т.н. І.К. Младецьким*