

В. І. ДМИТРЕНКО, І. Г. ЗЕЗЕКАЛО, А. П. КРОЛЬ

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕКОЛОГІЧНО-БЕЗПЕЧНИХ ЗМАЩУВАЛЬНИХ ДОБАВОК ДО БУРОВИХ РІДИН

Застосування мастильних добавок (лубрикантів) у бурових та технологічних рідинах є ключовим для успішного будівництва нафтогазових свердловин. Вони відіграють вирішальну роль у покращенні техніко-технологічних, економічних та екологічних показників всього процесу. В останні роки у секторі промивних рідин для буріння глибоких нафтогазових свердловин особливою актуальністю набули екологічно-безпечні змащувальні добавки. У роботі представлені результати експериментальних досліджень антифракційних властивостей екологічно безпечних композицій змащувальних добавок. Розроблено нову екологічно безпечну змащувальну добавку до промивальних рідин з покращеними трибологічними характеристиками, яка забезпечує безаварійну проводку стовбуру нафтогазової свердловини, в т.ч. і під час розкриття порід, що включають питні і потенційно питні горизонти підземних вод. За результатами лабораторних експериментів встановлено, найкращі показники за змащувальною здатністю, термостійкістю та стійкістю до солей мають композиції, що базуються на алкіламінінних солях суміші жирних кислот рослинних олій та талової олії. Встановлено, що композиція «Бурол-2» найбільш ефективно впливає на трибологічні характеристики промивальної рідини. Коефіцієнти тертя КТК і $K_{\text{МТП}}$ значно знижуються при концентрації змащувальної добавки 0,5% об., при цьому адгезійні властивості досягають регламентованих значень ($K_{\text{пр}} < 30$). Оптимальною добавкою до модельних промивальних рідин цього типу можна вважати – 1,0 % об. Розроблена композиція складається з екологічно безпечних компонентів на основі алкіламінінних солей суміші виділених жирних кислот рослинних олій і талової олії з добавками хімічних реагентів, що поліпшують емульгацію, протипінну дію, протидепресантні низькотемпературні характеристики. Результати досліджень, свідчать, що змащувальні властивості модельних промивних рідин мають кращі показники при їх обробці 1,0 % об. розробленою композицією «Бурол-2» порівняно з іншими змащувальними добавками, що використовуються вітчизняними буровими підприємствами.

Ключові слова: буровий розчин; коефіцієнт змащування; мастильні властивості, буріння; триботехнічні властивості; буріння.

V. I. DMYTRENKO, I. G. ZEZEKALO, A. P. KROL

RESEARCH ON ENVIRONMENTALLY SAFE LUBRICANT ADDITIVES TO DRILLING FLUIDS

The use of lubricating additives (lubricants) in drilling and processing fluids is key to the successful construction of oil and gas wells. They play a decisive role in improving the technical, technological, economic and environmental performance of the entire process. In recent years, environmentally friendly lubricating additives have become particularly relevant in the sector of drilling fluids for deep oil and gas wells. The paper presents the results of experimental studies of the anti-fraction properties of environmentally safe compositions of lubricating additives. A new environmentally safe lubricating additive for flushing fluids with improved tribological characteristics has been developed, which ensures trouble-free drilling of the oil and gas wellbore, including during the exposure of rocks containing drinking and potentially drinking groundwater horizons. According to the results of laboratory experiments, the best indicators in terms of lubricity, heat resistance and salt resistance are found in compositions based on alkylamine salts of a mixture of fatty acids of vegetable oils and tall oil. It was found that the composition "Burool-2" most effectively affects the tribological characteristics of the flushing fluid. The friction coefficients of CTC and KMTP are significantly reduced at a concentration of the lubricating additive of 0.5% vol., while the adhesive properties reach regulated values ($K_{\text{pr}} < 30$). The optimal additive to model flushing fluids of this type can be considered to be 1.0% vol. The developed composition consists of environmentally safe components based on alkylamine salts of a mixture of selected fatty acids of vegetable oils and tall oil with additives of chemical reagents that improve emulsification, anti-depressant effect, and anti-depressant low-temperature characteristics. The results of the research show that the lubricating properties of model flushing fluids have better indicators when treated with 1.0% vol. of the developed composition "Burool-2" compared to other lubricating additives used by domestic drilling enterprises.

Keywords: drilling fluid; lubrication coefficient; lubricating properties, drilling; tribotechnical properties; drilling.

Вступ. Аспекти застосування мастильних добавок – лубрикантів у бурових розчинах та технологічних рідинах займають особливе важливе місце у техніко-технологічних, економічних та екологічних показники успішності будівництва нафтогазових свердловин. Модифікація бурових промивних рідин шляхом поліпшення їх триботехнічних властивостей є досить ефективним способом підвищення довговічності обсадних труб, елементів бурильних колон [1–2].

В останні роки у секторі промивних рідин для буріння глибоких нафтогазових свердловин особливою актуальністю набули екологічно-безпечні змащувальні добавки [1–3].

У даний час при розкритті водоносних горизонтів (питних і потенційно питних) використовують в якості змащувальних добавок відходи перероблення рослинних олій – гідрофуз, кофос тощо. Але ці змащувальні добавки мають низькі технологічні властивості (недостатня гідрофобізуюча дія, висока в'язкість при низьких температурах, низька розчинність у переважній більшості промивальних

рідин). Крім того, для досягнення потрібних змащувальних властивостей на оброблення промивальної рідини необхідно витратити значну їх кількість (так, наприклад, необхідна концентрація гідрофузу може становити 10-20 % об.) [1–3]. Це робить застосування подібних змащувальних добавок недоцільним як з технологічної, так і з економічної точок зору. Тому, як правило, невідворотною альтернативою є оброблення промивальних рідин сировою нафтою в кількості 7–10 % від об'єму промивальної рідини, при цьому застосування нафти в якості змащувальної добавки до промивальних рідин має наступні негативні наслідки: забруднюються підземні водоносні горизонти; забруднюється повітря в робочій зоні і навколо бурової установки вуглеводнями внаслідок випаровування легких фракцій нафти; забруднюються ґрунти і підземні води під час збирання і зберігання забруднених нафтою відходів буріння в шламових амбарах на території бурових майданчиків, а також

під час проведення робіт з технічної рекультивції [4-5].

Крім того, не виправдано в досить значних об'ємах (від декількох десятків до сотень тонн на одну свердловину) витрачається нафта. Так, на бурових підприємствах України в середньому на 1 метр проходки витрачається до 50 кг сирової нафти. Україна забезпечує себе нафтою власного видобутку лише на 15 %. Виходячи з цього, нафта є стратегічною сировиною для України і повинна використовуватися виключно за її цільовим призначенням для нафтохімічної промисловості, в тому числі для виробництва енергоносіїв [1-6].

Враховуючи високу дефіцитність нафти для народного господарства України і її вартість, а також серйозні екологічні і санітарно-гігієнічні проблеми, що виникають при її застосуванні в якості змащувальної добавки, постає важлива задача – розробити екологічно безпечні, з покращеними технологічними властивостями змащувальні добавки до промивальних рідин на неуглеводній основі, виробництво яких можна було б налагодити з вітчизняної сировини для забезпечення потреб споруджування нафтогазових свердловин в Україні.

Аналіз існуючих розробок та застосовуваних вітчизняних і зарубіжних мастильних добавок для бурових розчинів при бурінні та завершенні свердловин. Сучасний рівень розвитку нафтовидобувної галузі висуває підвищені вимоги до мастильних добавок для бурових розчинів. Вони повинні ефективно працювати у складних гірничо-геологічних умовах, що характеризуються високими температурами й тиском, полімінеральною та корозійною агресією. До останнього часу, коли масово проводилося буріння вертикальних стволів, мастильні добавки виступали допоміжними реагентами. Як мастильні добавки використовувалися переважно товарні продукти, розроблені й вироблені промисловістю для інших цілей [1-5].

Традиційними та одними з перших мастильних добавок до бурових розчинів на водній основі були нафта, нафтопродукти та графіт [1-3]. Нафта, що міститься в емульсії, змочує поверхню доліт, бурильних труб, що знижує схильність до забивання шламом проміжків між зубцями долота, а також зменшує ймовірність прихоплення бурового інструменту, сприяючи підвищенню гідравлічної потужності, що підводиться до вибою, та зменшенню сили тертя між металевою поверхнею й глинистою кіркою [7]. Як мастильні добавки використовувалися також нафтопродукти, такі як смола поліалкілбензолів або важка піролізна смола, дизельне паливо, яке є важким залишковим продуктом прямої перегонки нафти, відходи нафтопереробних заводів у вигляді нафтових шламів, відходи контактної очистки олив при їхньому виробництві на нафтопереробних заводах [8].

Вплив графіту на підвищення мастильних властивостей бурового розчину пояснюється явищем

пластифікації третьових поверхонь із формуванням м'якшого поверхневого шару, що сприяє усуненню мікрошорсткостей, локалізації тертя й зношування, а також зниженню питомих навантажень у зоні тертя [9-12]. Як відомо, графіт має високу адсорбційну здатність, внаслідок чого адсорбовані речовини (пари води, кисень, вуглеводні, пари органічних і неорганічних речовин), проникаючи в міжплощинні простори графіту та збільшуючи відстань між площинами, знижують поверхневу енергію між ними та міцність адсорбційного шару [12]. У практиці буріння свердловин для посилення адгезії частинок технічного вуглецю до поверхні металу використовують суміші графіту з нафтою або нафтопродуктами [11]. Однак навіть при застосуванні такої технології міцність адсорбційного шару, що має фізичний зв'язок із поверхнею металу, залишається низькою, внаслідок чого він витісняється з пар тертя і не здатний витримувати високі контактні навантаження [12].

Слід зазначити, що крім згаданих недоліків, використання нафти як мастильної добавки призводить до прискорення зношування гумових деталей і вузлів тертя бурових насосів і вибійних двигунів, спотворення результатів геофізичних досліджень, нетехнологічності, токсичності, пожежної небезпеки та забруднення навколишнього середовища [1-4]. Додавання до глинистого розчину нафти навіть у кількості 10% є недостатньо ефективним, оскільки в умовах високих контактних напружень, що виникають в опорі долота, нафта не створює на сталевих поверхнях достатньо міцної хемосорбційної плівки [3-4]. Крім того, застосування нафти призводить до безповоротної втрати цінної сировини, тому питання про виключення нафти як мастильної добавки є дуже важливим.

Суміш гудронів (СГ) є побічним продуктом (відходом) масложирового виробництва і утворюється в результаті дистиляції жирних кислот і соапстоків рослинних олій (бавовняної, соняшnikової), тваринних жирів, а також їхніх сумішей. Активними змащувальними речовинами в СГ є насичені та ненасичені жирні кислоти й їхні складні ефіри. Рівень прояву протизносних і змащувальних властивостей змащувальної добавки СГ значною мірою залежить від лужності середовища і наявності в ньому катіонів кальцію та магнію [1-5, 13]. Унаслідок взаємодії СГ з цими катіонами, а також при $\text{pH} > 10,5$ ефективність її як змащувальної добавки різко погіршується. СГ добре сумісна як зі звичайними, так і з обтяженими буровими розчинами, але погано сумісна з нафтоемульсійними. При концентрації нафти в розчині понад 5% протизносні властивості СГ різко погіршуються [14].

У складі бавовняного соапстоку містяться жирні кислоти, нейтральний жир і госсипол, продукти його перетворення, окиснення, взаємодії з білками, фосфатидми, жирними кислотами та нейтральним жиром. Під час дистиляції жирних кислот відбуваються досить складні процеси подальшого

перетворення похідних госиполу, їхньої взаємодії між собою, з ненасиченими кислотами та іншими супутніми речовинами. У результаті цих процесів одночасно з відгонкою жирних кислот утворюється госиполова смола [15]. За складом, структурою та властивостями госипол належить до поліфенолів, має властивості високоефективного антиоксиданту, універсального стабілізатора комплексної дії та чинить пластифікуючий і модифікуючий вплив на поверхню тертя [15]. Однак, незважаючи на високі змащувальні властивості, використання госиполу як змащувальної добавки ускладнене через його високу в'язкість при температурах 283 К і нижче. Розрідження шляхом введення до складу нафтопродуктів не набуло поширення через їх дефіцит [15–17].

При бурінні свердловин, починаючи з 70-х років, як змащувальні добавки для бурових розчинів використовують реагенти на основі гідрофобізуючої кремнійорганічної рідини (мононатрієві солі етилметилсинантриолу) ГКЖ-10, ГКЖ-11 [19–20].

Присутність у буровому розчині 0,6–0,8% ГКЖ-10 дає такий самий змащувальний ефект, як додавання 20% нафти. За уточненими даними А.К. Самотоя, який проводив дослідження з використанням математичної теорії планування експерименту, оптимальний вміст ГКЖ-10 у буровому розчині відповідає лише 6–8% нафти. Ним також доведена доцільність обробки бурового розчину змащувальною композицією, що складається з 6–8% нафти і 1% ГКЖ-10.

Покращення змащувальних властивостей бурових розчинів досягається введенням у буровий розчин спеціальних реагентів – поверхнево-активних речовин (ПАР). Згідно з дослідженнями П.А. Ребиндера, ПАР, адсорбуючись на твердих поверхнях, створюють орієнтовані молекулярні шари, які мають певну механічну міцність та змінюють енергетичні характеристики цих поверхонь [1–5].

Як змащувальні добавки використовують головним чином ПАР аніоноактивні – різні алкіларилсульфонати (сульфонол, сульфонатрієва сіль-СНС, КЧНР та інші), неіоногенні — поліоксиетильовані алкілфеноли (ОП-10, шкопау, превоцел тощо). Серед алкіларилсульфонатів найпоширеніші сульфоноли різних вид. Водночас дослідження показали, що в умовах високої напруженості сульфонол сприяє підвищенню швидкості зносу сталі, а застосування сульфонолу в мінералізованих водах призводить до утворення пластивчастих осадів [21].

Відомо, що більшість ПАР через дифільну природу будови молекул викликають сильне спінення промивних рідин, що різко погіршує працездатність насосів, гідравлічних забійних двигунів, але найважливіше – може спричинити аварійну ситуацію через втрату щільності бурового розчину. Іншою серйозною проблемою є схильність до висолювання низькомолекулярних аніоноактивних ПАР типу алкілсульфонатів, алкіларилсульфонатів та

високкомолекулярних ПАР типу акрилових полімерів [21].

Вимогам солестійкості відповідають неіоногенні сполуки, проте вони менш ефективні за іоногенні ПАР для покращення змащувальної дії бурових розчинів [21].

Приблизно до 1995 року, коли почалося інтенсивне буріння горизонтальних свердловин великої протяжності та бічних стовбурів, ставлення до змащувальних добавок змінилося. Ускладнення геометрії стовбура та буріння свердловин у складних гірничо-геологічних умовах посилили вимоги до змащувальних добавок, що викликало потребу у проведенні спеціальних досліджень для розробки нових, більш ефективних змащувальних добавок [1–2].

Почалося широке використання не лише товарних продуктів (як допоміжних речовин), а й спеціально розроблених реагентів основного призначення як змащувальних добавок.

Дослідження багатьох авторів дозволяють розширити уявлення про механізм змащувальної дії на межі з металевою поверхнею, визначити групи найбільш перспективних змащувальних складів, переважно хемосорбційної дії [14].

Як змащувальні добавки для бурових розчинів досліджувалися суміші синтетичних вищих спиртів з різним вмістом атомів вуглецю в молекулах [14]. Найвищими протизносними та змащувальними властивостями володіє суміш спиртів із вмістом у молекулах 10–12 атомів вуглецю.

Однак слід зазначити, що зі збільшенням вмісту атомів вуглецю у молекулах спирту його розчинність у воді погіршується, щільність бурового розчину знижується на 3% (при концентрації ТС 10 1%). Крім того, змащувальний шар, створюваний сумішшю вищих синтетичних спиртів, не витримує високих контактних навантажень [22].

Широке застосування при бурінні та завершенні свердловин полігліколеві бурові розчини, присутність у яких полігліколю з класу багатоатомних спиртів забезпечує покращення змащувальних, інгібуючих, поверхнево-активних властивостей [22–23]. Використання високомалекулярного поліетиленгліколю як флокулянту надколоїдних часток дозволило отримати недиспергуючі бурові розчини нового типу з покращеними інгібуючими та змащувальними властивостями. Ефективність застосування поліалкіленгліколів зростає з підвищенням кількості кінцевих гідроксильних груп у їхніх молекулах. Розгалужені ПАР, маючи значний запас структури, характеризуються високою технологічною ємністю, що зумовлює їхнє успішне використання у різних галузях буріння [22].

Останніми роками було запропоновано низку нових змащувальних добавок на основі природної сировини [1–5, 22].

Найбільш перспективними та універсальними змащувальними добавками до бурових розчинів є хімічні сполуки на основі насичених і ненасичених

карбонових (жирних) кислот або їх мила [1–5]. Ефективність таких змащувальних добавок обумовлена утворенням на металевих поверхнях міцних в'язкопластичних хемосорбційних плівок органометалевих водонерозчинних мил, що мають високу адгезійну і когезійну здатності. Такі плівки забезпечують надійний захист металу від зношування в умовах граничного тертя та низький опір тангенційному переміщенню одна відносно одної. Менш ефективними є омилені продукти (олеат натрію, окислений петролатум, милонафт тощо), що пов'язано, на думку Ф. Бодуена, з їхньою хорошою водорозчинністю, яка сприяє швидкому змиванню плівки з поверхні тертя.

Підвищеними змащувальними властивостями володіють водні середовища з добавками високомолекулярних карбонових кислот, а також деяких речовин, активним компонентом яких є високомолекулярні карбонові кислоти та їх похідні [4–5]. Дослідження показали, що багато змащувальних добавок знижують коефіцієнт тертя у водному середовищі, деякі добавки знижують його (хоча й меншою мірою) у прісному бентонітовому буровому розчині, і тільки жирні кислоти, сульфатовані жирні кислоти та суміш тригліцеридів і спиртів знижують тертя як у прісних, так і в мінералізованих бурових розчинах. Останні добавки, крім того, ефективні й для бурових розчинів на морській воді.

Використання жирних кислот як змащувальних добавок обмежене через їх дефіцитність і високу вартість. Тому як джерело жирних кислот використовуються промислові відходи — синтетичні жирні кислоти (середні та вищі фракції СЖК) та їх кубові залишки, соапстоки, госиполові смоли, гудрони жирової промисловості, відходи гліцеринового виробництва, талове масло, що отримується при сульфатному способі виробництва целюлози тощо [5].

Оскільки ефективність змащувальних добавок на основі карбонових кислот підвищується зі збільшенням довжини вуглеводневих ланцюгів і вмісту атомів вуглецю, як основу багатьох відомих змащувальних речовин рекомендовано застосовувати синтетичні жирні кислоти або їх кубові залишки фракції C20-25 [1–5].

Окрім зазначених вище, запропонувалися змащувальні добавки до бурових розчинів на основі синтетичних жирних кислот, оброблених нижчими одноатомними спиртами або олігомерними поліетиленгліколями чи їх сумішами, кубовими залишками виробництва бутилових спиртів, поліалкіленгліколем [22].

Для покращення змащувальної здатності бурового розчину рекомендовано використовувати кубові залишки (КО), які є відходами виробництва синтетичних жирних кислот у процесі їх отримання з нафти шляхом окислення парафінових вуглеводнів.

Досвід промислового застосування в якості змащувальної добавки до бурових розчинів сирих талових масел показав, що вони характеризуються

низькими змащувальними властивостями через погану емульгованість у водних середовищах та низьку технологічність, зумовлену загустінням при температурі $-5-10^{\circ}\text{C}$ [2].

Роботи показали, що для отримання змащувальної добавки комплексної протизносної та стабілізуючої дії можна використовувати головну фракцію від ректифікації талового масла – легке талове масло.

Порівняльні випробування змащувальних речовин [23] показали, що при значних навантаженнях ефективність застосування імпортованих змащувальних засобів (Bit Lube - США, Madoil - Японія та ін.) у два-три рази нижча, ніж кубових залишків жирних кислот [55].

При бурінні нафтових і газових свердловин в Угорщині, колишній Чехословаччині, Польщі, Болгарії та Німеччині в якості основи або компонентів змащувальних добавок використовують талове масло, олеїн, касторове масло; вищі жирні та смоляні кислоти або їх мила; сульфатовані рослинні жири; емульговані рослинні жири та гліцериди вищих жирних кислот і їх хлорні похідні; алкілбензолсульфонати [13, 23].

Незважаючи на здаване різноманіття та велику кількість змащувальних засобів, які пропонуються до використання вітчизняними та зарубіжними виробниками, вони незначно відрізняються за своїми експлуатаційними характеристиками і є схожими за своєю природою.

У зв'язку з цим, практичне буріння все ще потребує змащувальних добавок більш високого рівня, які здатні виконувати свої функції в широкому діапазоні температур, солевих та інших агресивних факторів. Разом з тим, змащувальна добавка, перебуваючи в системі бурового розчину, не повинна бути індиферентною, а повинна сприяти поліпшенню загальних технологічних та спеціальних показників бурового розчину, тобто бути поліфункціональною за своїм характером.

Таким чином, проблема створення вискоефективної змащувальної добавки нового покоління, що ґрунтується не на традиційному підході, є на сьогодні однією з актуальних у сучасній практиці буріння.

Мета роботи: розробка нової екологічно безпечної змащувальної добавки до промивальних рідин з покращеними трибологічними характеристиками, яка б забезпечувала безаварійну проводку стовбура нафтогазової свердловини, у т.ч. і під час розкриття порід, що включають питні і потенційно питні горизонти підземних вод.

Матеріали та методи дослідження

Для проведення лабораторних досліджень з визначення змащувальних властивостей було приготовано два типи моделей промивальних рідин з наступними складом і характеристиками (табл. 1):

- **модель №1** – склад: 10% мас. бентоніту, 5% мас. KCl, 2% мас. CaSO_4 , 5% мас. лігносульфонату, 0,7% мас. КМЦ, 25% мас. BaSO_4 , вода – решта.

- модель №2 – склад: 18% мас. бентоніту, 5% NaCl, 10% мас. лігносульфонату, 0,5% мас. КМЦ, 30% мас. BaSO₄, вода – решта.

Таблиця 1

Показники моделей промивальних рідин

Показники промивальної рідини	Модель 1 бурового розчину	Модель 2 бурового розчину
питома вага (γ), г/см ³	1,34	1,36
в'язкість умовна (τ), с	11	20
статичне напруження зсуву (CHЗ), дПа	3/10	35/49
фільтрація (Φ), см ³ /30хв	7	6
товщина кірки (δ), мм	3	2
коефіцієнт тертя кірки (КТК)	> 0,5	0,46
коефіцієнт адгезії кірки (K_{np})	72	61
коефіцієнт ковзання на МТП ($K_{МТП}$)	> 0,3	>0,3

Були придбані матеріали: суміш виділених кислот ріпакової олії, гідроване касторове масло, осіркована талова олія, гідроксистеаринова кислота, поліетиленгліколь різної молекулярної маси, енпосан-К, гідрофузи різних олійноекстракційних підприємств України та інші хімеагенти для складання рецептур змащувальних добавок. Виконані лабораторні роботи з визначення характеристик, фізико-хімічних властивостей придбаних матеріалів.

У процесі лабораторних досліджень наявної сировини і матеріалів було визначено, що найкращі властивості по змащувальній здатності, термостійкості та солестійкості мають композиції на основі алкіламініх солей суміші виділених жирних кислот рослинних олій і талової олії з добавками хімічних реагентів, що поліпшують емульгацію, протипінну дію, протидепресантні низькотемпературні характеристики [59].

Після попередньої апробації було виділено три композиції, які умовно позначили – «Бурол – 1», «Бурол – 2», «Бурол – 3».

Випробувальні концентрації змащувальних добавок становили % об. до об'єму модельної

промивальної рідини – 0,5; 1,0; 1,5 [59]. Температура випробувань – 20 °С $\pm$ 2 °С і 90 °С $\pm$ 5 °С [59].

Для визначення параметрів промивальної рідини використовувалося наступне лабораторне обладнання [59]:

- питома вага – ваги важільні ВРП-1;
- в'язкість умовна – віскозиметр польовий СПВ-5;
- статичне напруження зсуву – СНС-2;
- фільтрація – ВМ-6;
- КТК – КТК-2М;
- K_{np} – ПКП-1М;
- $K_{МТП}$ – машина тертя польова МТП.

Методики виконання вимірювань, які застосовувалися під час лабораторних досліджень, викладені в РД 41-5804046-91.

Результати досліджень

Виконані дослідження з розробки ефективних рецептур змащувальних добавок та лабораторні дослідження з оцінки їх технологічних властивостей на типових моделях промивальних рідин з високими фрикційними властивостями.

При складанні дослідних рецептур змащувальних добавок керувалися такими критеріями:

- при виготовленні змащувальних добавок не повинні утворюватися сполуки більше IV класу небезпечності з невизначеними токсикологічними показниками;
- рецептури повинні бути сумісними з тими типами промивальних рідин, які на сьогодні найбільше поширені при спорудженні нафтогазових свердловин в Україні;
- під час застосування в будь-яку пору року змащувальні добавки не повинні втрачати свої властивості, а в зимовий період мають зберігати рідинний стан до температури навколишнього середовища не менше – (мінус) 10 °С;
- не викликати корозії бурильного інструменту;
- забезпечувати надійну змащувальну дію при вибійних температурах до 100 °С;
- не утворювати в циркуляційній системі бурової установки і системі накопичення відходів буріння нерозчинних поверхневих плівок.

Таблиця 2

Результати лабораторних випробувань змащувальної композиції «Бурол-2» (t випробувань – 20 °С)

Найменування параметру	Один. виміру	№ моделі промивальної рідини					
		№ 1			№ 2		
		конц. доб. «Бурол-2», % об.			конц. доб. «Бурол-2», % об.		
		0,5	1,0	1,5	0,5	1,0	1,5
γ	г/см ³	1,34	1,32	1,32	1,36	1,35	1,35
τ	сек.	11	10	9	17	16	16
CHЗ	дПа	4/14	5/13	6/11	33/49	29/43	27/38
Φ	см ³ /30хв	8	8	8	5	5	5
δ	мм	3,0	2,5	2,5	2,0	2,0	2,0
КТК	–	0,25	0,19	0,14	0,32	0,20	0,13
K_{np}	–	14	16	7	22	13	9
$K_{МТП}$	–	0,12	0,10	0,10	0,15	0,11	0,10

Таблиця 3

Результати лабораторних випробувань змащувальної композиції «Бурол-2» (t випробувань – 90 °С)

Найменування параметру	Один. виміру	№ моделі промивальної рідини					
		№ 1			№ 2		
		конц. Доб. «Бурол-2», % об.			конц. доб. «Бурол-2», % об.		
		0,5	1,0	1,5	0,5	1,0	1,5
γ	г/см ³	1,32	1,31	1,31	1,34	1,33	1,33
τ	сек.	11	11	11	24	20	18
CHЗ	дПа	11/18	13/21	12/19	31/52	33/46	24/32
Ф	см ³ /30хв	10	10	10	8	8	8
δ	мм	3,0	3,0	3,0	2,5	2,5	2,5
КТК	–	0,28	0,20	0,15	0,36	0,22	0,19
K_{np}	–	19	17	9	26	16	11
$K_{mтп}$	–	0,14	0,12	0,12	0,17	0,14	0,12

У результаті виконаних досліджень було встановлено, що композиція під умовним позначенням «Бурол-2» виявилася найбільш ефективною з точки зору її впливу на поліпшення змащувальних властивостей промивальної рідини. Нижче в таблицях 2 та 3 наведені результати лабораторних випробувань змащувальної композиції «Бурол-2».

Із результатів, наведених в таблицях 2 та 3 слідує, що змащувальна добавка «Бурол-2» в межах досліджених концентрацій ефективно впливає на трибологічні характеристики промивальної рідини. Вже при додаванні 0,5% об. значно знижуються коефіцієнти тертя КТК і $K_{mтп}$, а адгезійні властивості досягають регламентованих значень ($K_{np} < 30$).

Оптимальною добавкою до модельних промивальних рідин цього типу можна вважати – 1,0 % об. При цьому показники, що характеризують змащувальні властивості промивальної рідини, відповідають нормальним безаварійним умовам промивки свердловин.

Таблиця 4

Результати досліджень змащувальних добавок до промивальних рідин (t випробувань – 90 °С)

№ з/п	Тип змащувальної добавки	Найменування параметру		
		КТК	K_{np}	$K_{mтп}$
1.	Модель промив. рідини № 1	> 0,5	72	> 0,3
2.	Модель промив. рідини № 2	0,46	61	> 0,3
3.	№ ₁ + 7,0 % об. нафта	0,29	32	0,16
4.	№ ₂ + 7,0 % об. нафта	0,28	26	0,14
5.	№ ₁ + 5,0 % об. кофос	0,34	35	0,23
6.	№ ₂ + 5,0 % об. кофос	0,37	41	0,22
7.	№ ₁ + 2,0 % об. лабрикол	0,27	24	0,20
8.	№ ₂ + 2,0 % об. лабрикол	0,23	26	0,24
9.	№ ₁ + 2,0 % об. савенол	0,26	22	0,17
10.	№ ₂ + 2,0 % об. савенол	0,23	25	0,16
11.	№ ₁ + 1,0 % об. «Бурол-2»	0,20	17	0,12
12.	№ ₂ + 1,0 % об. «Бурол-2»	0,22	16	0,14

Температура мало впливає на результати обробки в інтервалі 20 ÷ 90 °С. Також були проведені порівняльні випробування розробленої композиції «Бурол-2» з іншими змащувальними добавками. Результати порівняльних випробувань наведені в таблиці 4.

Результати досліджень, викладених в табл. 4, свідчать, що змащувальні властивості модельних промивних рідин мають кращі показники при їх обробці 1,0 % об. розробленою композицією «Бурол-2» порівняно з іншими змащувальними добавками, що використовуються вітчизняними буровими підприємствами.

Розроблена композиція складається з екологічно безпечних компонентів на основі алкіламінічних солей суміші виділених жирних кислот рослинних олій і талової олії з добавками хімічних реагентів, що поліпшують емульгацію, протипінну дію, протидепресантні низькотемпературні характеристики.

За агрегатним станом змащувальна добавка характеризується як рідина світло-бежевого кольору із слабким ароматичним запахом, густина – 1030 кг/м³, рН – 9-10, розчинність – легко утворює суспензію з водою, не летка - парів в повітрі не утворює. Повітря робочої зони при використанні змащувальної добавки не забруднюється. Обробка промивальної рідини проводиться протягом циклу, безпосереднім введенням в промивальну рідину. Згідно з розрахунком індексу небезпеки розроблена змащувальна добавка відноситься до IV класу небезпеки (речовини малобезпечні).

Висновки

1. Визначено, що найкращі властивості по змащувальній здатності, термостійкості та солестійкості мають композиції на основі алкіламінічних солей суміші виділених жирних кислот рослинних олій і талової олії з добавками хімічних реагентів, що поліпшують емульгацію, протипінну дію, протидепресантні низькотемпературні характеристики.

2. У результаті лабораторних досліджень встановлено, що композиція «Бурол-2» найбільш

ефективно впливає на трибологічні характеристики промивальної рідини. Вже при додаванні 0,5% об. значно знижуються коефіцієнти тертя КТК і $K_{\text{МТП}}$, а адгезійні властивості досягають регламентованих значень ($K_{\text{пр}} < 30$). Оптимальною добавкою до модельних промивальних рідин цього типу можна вважати – 1,0 % об.

3. Порівняльні випробування розробленої композиції «Бурол-2» з іншими змащувальними добавками свідчать, що змащувальні властивості модельних промивних рідин мають кращі показники при їх обробці 1,0 % об. розробленою композицією «Бурол-2» порівняно з іншими змащувальними добавками, що використовуються вітчизняними буровими підприємствами.

Список літератури

1. Дмитренко В.І., Дяченко Ю.Г. Підвищення змащувальних властивостей водноглинистих бурових розчинів під час похило-скерованого та горизонтального буріння. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Сер. Хімія, хімічна технологія та екологія*. 2024. № 1 (11). С. 44–56. <https://doi.org/10.20998/2079-0821.2024.01.06>
2. Dmytrenko V., Diachenko Y. The impact assessment of plant oils on unctuousity of drilling fluids. *Technology audit and production reserves*. 2021. № 2/3(58). С. 25–30. <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2021.229652>
3. Al-Hameedi A. T., Alkinani H. H., Dunn-Norman S., Al-Alwani A. M., Alshammari F. A., Hussien Albazzaz W. H., Alkhamis M. M., Alashwak F. N., Mutar A. R. Insights into the application of new eco-friendly drilling fluid additive to improve the fluid properties in water-based drilling fluid systems. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2019, vol. 183, pp. 106–424. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2019.106424>
4. Бакулін Є.М., Драганчук О.Т., Процишин В.Т. Змащувальні добавки та їх вплив на функціональні властивості бурових рідин. *Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ*. 2011. № 4(41). С. 101–106.
5. Бакулін Є.М. Екологічні аспекти виробництва та застосування змащувальних добавок до бурових рідин. *Науковий вісник ІФНТУНГ*. 2013. № 1(34). С. 69–72.
6. Humood M., Ghamary M.H., Lan P., Iaccino L.L., Bao X., Polycarpou A.A. Influence of additives on the friction and wear reduction of oil-based drilling fluid. *An International Journal on the Science and Technology of Friction, Lubrication and Wear*. 2019, vol. 422–423, pp. 151–160. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2019.01.028>
7. Sönmez A., Kök V. M., Özel R. Performance analysis of drilling fluid liquid lubricants. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2013, vol. 108, pp. 64–73. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2013.06.002>
8. Jiaxue Li, Yao Ma, Jie Sun, Xiaoyan Li, Wenjun Lu, Jia Bi Using aged oil to produce drilling-fluid lubricants. *Geoenergy Science and Engineering*. 2024, vol. 234, pp. 212635. <https://doi.org/10.1016/j.geoen.2024.212635>
9. Zhang Y., Liu Y. Research on Applying Elastic Graphite to Drilling Fluid. *Natural Gas Industry*. 2003, vol. 23, pp. 42–44.
10. Quande Wang, Michal Slaný, Xuefan Gu, Zhipeng Miao, Weichao Du, Jie Zhang, Chen Gang Lubricity and Rheological Properties of Highly Dispersed Graphite in Clay-Water-Based Drilling Fluids. *Materials*. 2022, vol. 15(3), pp. 1083. <https://doi.org/10.3390/ma15031083>
11. Lee H., Lee H.-B.-R., Kwon S., Salmeron M., Park J.Y. Internal and External Atomic Steps in Graphite Exhibit Dramatically Different Physical and Chemical Properties. *ACS Nano*. 2015, vol. 9, № 4, pp. 3814–3819. <https://doi.org/10.1021/nn506755p>
12. Motozuka S., Sato H., Muramatsu Y., Morinaga M. Interfacial effect between graphite and iron substrate on basal plane orientation and lubricity of graphite. *Tribology International*. 2020, vol. 151, pp. 106455. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2020.106455>

13. Bahari, A., Lewis, R. and Slatter, T. Friction and wear phenomena of vegetable oil based lubricants with additives at severe sliding wear conditions. *Tribology Transactions*. 2017, vol. 61, № 2, pp. 207–219. <https://doi.org/10.1080/10402004.2017.1290858>

14. Xiangyang Zhaoa, Daqi Lia, Heming Zhua, Jingyuan Mab and Yuxiu An Advanced developments in environmentally friendly lubricants for water-based drilling fluid: a review. *RSC Advances*. 2022, № 35, pp. 22853–22868. <https://doi.org/10.1039/D2RA03888A>

15. Kobilov N. S. Development of effective lubricants for drilling fluids. *The Austrian Journal of Technical and Natural Sciences*. 2024, vol. 24, № 1–2, pp. 90–93. doi:10.29013/AJT-24-1.2-90-93

16. Kobilov N., Kamolova Z., Shukurov A., Xushnazarov S., Sulaymonov I., Xalimov A., Abdurakhmonova N. Development of New Composite Chemical Reagents and Their Implementation. *International Journal of Advanced Research in Science, Engineering and Technology*. 2021, vol. 8, № 1, pp. 16453–16457.

17. Negmatova, K. S., Negmatov, S. S., Salimsakov, Y. A., Rakhimov, H. Y., Negmatov, J. N., Isakov, S. S., Negmatova, M. I. Structure and properties of viscous gossypol resin powder. In *AIP Conference Proceedings* (2012, July, American Institute of Physics). 2012, vol. 1459, № 1, pp. 300–302.

18. Tao Xiang, Cypress, Remy Azrai Water-based mud lubricant using fatty acid polyamine salts and fatty. Patent Application Publication US, №: US 2011/0036579 A1, 2011. <https://patentimages.storage.googleapis.com/30/d5/ba/b0eeb94bd1f233/US20110036579A1.pdf>

19. Вдовиченко А. И. Экологические аспекты повышения эффективности геологоразведочного бурения. *Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент – техника и технология его изготовления и применения*. 2007. Вип. 10. С. 24–29.

20. Dina Kania, Robiah Yunus, Rozita Omar, Suraya Abdul Rashid, Badrul Mohamed Jan, Akmal Aulia Lubricity performance of non-ionic surfactants in high-solid drilling fluids: A perspective from quantum chemical calculations and filtration properties. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2021, vol. 207, pp. 109162. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2021.109162>

21. Fu-chang You, Shu-sheng Zhou, Dian Ke, Yue Huang Effect of a Novel Lubricant Embedded with Alcohol Ether, Amide and Amine Motifs for Silicate Drilling Fluid on Bit Balling and Lubrication: an Experimental Study. *Arabian Journal for Science and Engineering*. 2022, vol. 47(2), pp. 11879–11886. doi:10.1007/s13369-022-06730-8

22. Dina Kania, Robiah Yunus, Rozita Omar, Suraya Abdul Rashid, Badrul Mohamad Jan A review of biolubricants in drilling fluids: Recent research, performance, and applications. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2015, vol. 135, pp. 177–184. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2015.09.021>

References (transliterated)

1. Dmytrenko V.I., Diachenko Yu.H. Pidvyshchennia zmaschchuvannykh vlastyvoستي vodnohlynystykh burovykh rozchyniv pid chas pokhylo-skerovanoho ta horyzontalnoho burinnia. *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «KhPI»*. Ser. Khimiia, khimichna tekhnolohiia ta ekolohiia. 2024. № 1 (11). S. 44–56. <https://doi.org/10.20998/2079-0821.2024.01.06>
2. Dmytrenko V., Diachenko Y. The impact assessment of plant oils on unctuousity of drilling fluids. *Technology audit and production reserves*. 2021. № 2/3(58). С. 25–30. <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2021.229652>
3. Al-Hameedi A. T., Alkinani H. H., Dunn-Norman S., Al-Alwani A. M., Alshammari F. A., Hussien Albazzaz W. H., Alkhamis M. M., Alashwak F. N., Mutar A. R. Insights into the application of new eco-friendly drilling fluid additive to improve the fluid properties in water-based drilling fluid systems. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2019, vol. 183, pp. 106–424. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2019.106424>
4. Бакулін Є.М., Драганчук О.Т., Процишин В.Т. Змащувальні добавки та їх вплив на функціональні властивості бурових рідин. *Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ*. 2011. № 4(41). С. 101–106.

5. Бакулін Є.М. Екологічні аспекти виробництва та застосування змащувальних добавок до бурових рідин. *Науковий вісник ІФНТУНГ*. 2013. № 1(34). С. 69–72.
6. Humood M., Ghamary M.H., Lan P., Iaccino L.L., Bao X., Polycarpou A.A. Influence of additives on the friction and wear reduction of oil-based drilling fluid. *An International Journal on the Science and Technology of Friction, Lubrication and Wear*. 2019. vol. 422-423, pp. 151–160. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2019.01.028>.
7. Sönmez A., Kök V. M., Özel R. Performance analysis of drilling fluid liquid lubricants. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2013, vol. 108, pp 64-73. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2013.06.002>
8. Jiaxue Li, Yao Ma, Jie Sun, Xiaoyan Li, Wenjun Lu, Jia Bi Using aged oil to produce drilling-fluid lubricants. *Geoenergy Science and Engineering*. 2024, vol. 234, pp. 212635. <https://doi.org/10.1016/j.geoen.2024.212635>
9. Zhang Y., Liu Y. Research on Applying Elastic Graphite to Drilling Fluid. *Natural Gas Industry*. 2003, vol. 23, pp. 42-44.
10. Quande Wang, Michal Slany, Xuefan Gu, Zhipeng Miao, Weichao Du, Jie Zhang, Chen Gang Lubricity and Rheological Properties of Highly Dispersed Graphite in Clay-Water-Based Drilling Fluids. *Materials*. 2022, vol. 15(3), pp. 1083. <https://doi.org/10.3390/ma15031083>
11. Lee H., Lee H.-B.-R., Kwon S., Salmeron M., Park J.Y. Internal and External Atomic Steps in Graphite Exhibit Dramatically Different Physical and Chemical Properties. *ACS Nano*. 2015, vol. 9, № 4, pp. 3814–3819. <https://doi.org/10.1021/nn506755p>
12. Motozuka S., Sato H., Muramatsu Y., Morinaga M. Interfacial effect between graphite and iron substrate on basal plane orientation and lubricity of graphite. *Tribology International*. 2020, vol. 151, pp. 106455. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2020.106455>.
13. Bahari, A., Lewis, R. and Slatter, T. Friction and wear phenomena of vegetable oil based lubricants with additives at severe sliding wear conditions. *Tribology Transactions*. 2017, vol. 61, № 2, pp. 207–219. <https://doi.org/10.1080/10402004.2017.1290858>
14. Xiangyang Zhaoa, Daqi Lia, Heming Zhua, Jingyuan Mabc and Yuxiu An Advanced developments in environmentally friendly lubricants for water-based drilling fluid: a review. *RSC Advances*. 2022, № 35, pp. 22853–22868. <https://doi.org/10.1039/D2RA03888A>
15. Kobilov N. S. Development of effective lubricants for drilling fluids. *The Austrian Journal of Technical and Natural Sciences*. 2024, vol. 24, № 1–2, pp. 90-93. doi:[10.29013/AJT-24-1.2-90-93](https://doi.org/10.29013/AJT-24-1.2-90-93)
16. Kobilov N., Kamolova Z., Shukurov A., Xushnazarov S., Sulaymonov I., Xalimov A., Abdurakhmonova N. Development of New Composite Chemical Reagents and Their Implementation. *International Journal of Advanced Research in Science, Engineering and Technology*. 2021, vol. 8, № 1, pp. 16453–16457.
17. Negmatova, K. S., Negmatov, S. S., Salimsakov, Y. A., Rakhimov, H. Y., Negmatov, J. N., Isakov, S. S., Negmatova, M. I. Structure and properties of viscous gossypol resin powder. In *AIP Conference Proceedings* (2012, July, American Institute of Physics). 2012, vol. 1459, № 1, pp. 300–302.
18. Tao Xiang, Cypress, Remy Azrai *Water-based mud lubricant using fatty acid polyamine salts and fatty*. Patent Application Publication US, №: US 2011/0036579 A1, 2011. <https://patentimages.storage.googleapis.com/30/d5/ba/b0eeb94bd1f233/US20110036579A1.pdf>
19. Vdovichenko A. I. Ekologicheskie aspekti povisheniya effektivnosti geologorazvedochnogo bureniya. Porodorazrushayushchii i metaloobrabativayushchii instrument – tekhnika i tekhnologiya yego izgotovleniya i primeneniya. 2007. Vip. 10. pp. 24–29.
20. Dina Kania, Robiah Yunus, Rozita Omar, Suraya Abdul Rashid, Badrul Mohamed Jan, Akmal Aulia Lubricity performance of non-ionic surfactants in high-solid drilling fluids: A perspective from quantum chemical calculations and filtration properties. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2021, vol. 207, pp. 109162. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2021.109162>
21. Fu-chang You, Shu-sheng Zhou, Dian Ke, Yue Huang Effect of a Novel Lubricant Embedded with Alcohol Ether, Amide and Amine Motifs for Silicate Drilling Fluid on Bit Balling and Lubrication: an Experimental Study. *Arabian Journal for Science and Engineering*. 2022, vol. 47(2), pp. 11879–11886. <https://doi.org/10.1007/s13369-022-06730-8>
22. Dina Kania, Robiah Yunus, Rozita Omar, Suraya Abdul Rashid, Badrul Mohamad Jan A review of biolubricants in drilling fluids: Recent research, performance, and applications. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2015, vol. 135, pp. 177–184. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2015.09.021>

Відомості про авторів / About the Authors

Дмитренко Вікторія Іванівна (Dmytrenko Viktoriia) – кандидат технічних наук, доцент, в.о. завідувача кафедри нафтогазової інженерії та технологій, Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», м. Полтава, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1678-2575>; e-mail: dmytr.v@gmail.com

Зезекало Іван Гаврилович (Zezekalo Ivan) – доктор технічних наук, професор, професор кафедри нафтогазової інженерії та технологій Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», м. Полтава, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9962-6905>; e-mail: 2012nadra@gmail.com

Кроль Анатолій Петрович (Krol Anatolii) – аспірант кафедри нафтогазової інженерії та технологій, Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», м. Полтава, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-3371-9527>; e-mail: tolikkrol111@gmail.com