



Прийнято 18.03.2026. Прорецензовано 26.05.2026. Опубліковано 29.05.2026.

УДК 622.24

DOI: 10.31471/1993-9965-2026-1(60)-74-87

АНАЛІЗ ПОШКОДЖУВАНОСТІ ГВИНТОВИХ ВИБІЙНИХ ДВИГУНІВ ПРИ РОБОТІ В УСКЛАДНЕНИХ УМОВАХ БУРІННЯ

Руденко О. О.

Аспірант

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

76019, Україна, м.Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15

<https://orcid.org/0009-0003-2765-5402>

e-mail: alexsanrd2a@gmail.com

Гриджук Я. С.

Доктор технічних наук, професор

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

76019, Україна, м.Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15

<http://orcid.org/0000-0002-1429-8640>

e-mail: jaroslav.gridzhuk@gmail.com

Слабий О. О.

Кандидат технічних наук, доцент

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

76019, Україна, м.Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15

<http://orcid.org/0000-0002-1274-2875>

e-mail: burewisnyk@gmail.com

Дейнега Р. О.

Кандидат технічних наук, доцент

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

76019, Україна, м.Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15

<http://orcid.org/0000-0003-1141-7672>

e-mail: ruslan.deineha@nung.edu.ua

Микитій І. М.

Доктор філософії,

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

76019, Україна, м.Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15

<http://orcid.org/0000-0002-8925-6349>

e-mail: ivan.myktyii@nung.edu.ua

Запропоноване посилання: Руденко, О. О., Гриджук, Я. С., Слабий, О. О., Дейнега, Р. О. & Микитій, І. М. (2026). Аналіз пошкоджуваності гвинтових вибійних двигунів при роботі в ускладнених умовах буріння. Науковий вісник ІФНТУНГ, 1(60), 74-87. doi: 10.31471/1993-9965-2026-1(60)-74-87

* Відповідальний автор



Copyright © The Author(s). This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

Анотація. У сучасних умовах буріння глибоких, похило-скерованих та горизонтальних свердловин гвинтові вибійні двигуни (ГВД) працюють під дією підвищених осьових, крутних та поперечних навантажень, що супроводжуються інтенсивними динамічними коливаннями, температурними впливами та агресивною дією бурових розчинів. Ускладнені умови експлуатації призводять до прискореного накопичення пошкоджень елементів силової секції, зокрема деградації еластомерного статора, втомного руйнування ротора, розвитку контактних та фретингових пошкоджень, а також термомеханічної нестабільності системи «ротор-статор». Це зумовлює зниження енергетичної ефективності двигуна, втрату герметичності робочих камер та передчасний вихід ГВД з ладу. Метою роботи є аналіз механізмів пошкоджуваності гвинтових вибійних двигунів в ускладнених умовах буріння та встановлення взаємозв'язку між напружено-деформованим станом елементів силової секції і експлуатаційними факторами. У дослідженні використано системний підхід, аналітичний аналіз наукових джерел, узагальнення промислових даних експлуатації, а також концептуальні положення механіки деформованого твердого тіла та трибології. Встановлено, що ключовими чинниками деградації ГВД є змінні контактні напруження в зоні спряження ротора і статора, циклічні деформації еластомеру, локальний перегрів, гідроабразивний вплив твердих частинок бурового розчину та динамічні перевантаження під час буріння. Обґрунтовано необхідність комплексного врахування амплітудно-частотних характеристик коливань, температурного режиму та гідравлічних параметрів при оцінці довговічності двигуна. Отримані результати можуть бути використані для вдосконалення методів прогнозування ресурсу ГВД, оптимізації режимів буріння та підвищення надійності роботи двигунів у складних геолого-технічних умовах.

Ключові слова: гвинтовий вибійний двигун; силова секція; ротор; статор; напружено-деформований стан; пошкоджуваність; довговічність.

Вступ

Гвинтові вибійні двигуни (ГВД) є ключовим елементом сучасної технології буріння нафтових і газових свердловин. Їхня надійна робота безпосередньо впливає на техніко-економічні показники всього процесу спорудження свердловини. Проте складні умови експлуатації призводять до інтенсивного зношування та передчасного виходу з ладу відповідальних деталей. ГВД працюють у середовищі агресивних промивальних рідин з високим вмістом абразивних часток. Постійні вібрації, значні осьові та радіальні навантаження створюють передумови для втомного руйнування металу. Найбільш вразливими вузлами традиційно вважаються робочі органи гвинтових секцій та підшипникові опори шпинделя. Дослідження причин пошкоджуваності дозволяє виявити слабкі місця в конструкції та технології виготовлення двигунів. Аналіз механізмів руйнування включає вивчення ерозійного, корозійного та механічного впливу на поверхні деталей. Важливо враховувати термобаричні умови, оскільки висока температура в глибоких свердловинах змінює властивості матеріалів. Систематизація даних про відмови допомагає розробити ефективні методи прогнозування залишкового ресурсу обладнання. Вивчення характеру тріщин та зламів дозволяє розрізнити випадкові перевантаження та закономірні процеси деградації. Впровадження нових зносостійких покриттів та оптимізація геометрії деталей є відповіддю на виклики щодо пошкоджуваності. Сучасний підхід до аналізу потребує застосування методів комп'ютерного моделювання та стендових випробувань. Розу-

міння механізмів процесів руйнування становить наукову основу для розроблення ГВД нового покоління з підвищеним ресурсом роботи. Мінімізація аварійних ситуацій, пов'язаних з поломкою двигунів, значно знижує вартість буріння. Таким чином, аналіз пошкоджуваності є критично важливим етапом для забезпечення енергетичної безпеки та ефективності галузі.

Аналіз сучасних закордонних і вітчизняних досліджень та публікацій

Сучасний розвиток нафтогазової галузі характеризується ускладненням геолого-технічних умов буріння, зростанням глибин свердловин, збільшенням протяжності горизонтальних ділянок та широким застосуванням похило-скерованого буріння [8]. У таких умовах (ГВД) залишаються одним із ключових елементів компоновки низу бурильної колони, забезпечуючи передачу крутного моменту безпосередньо на долото та підвищення ефективності руйнування гірських порід [3, 8]. Водночас інтенсифікація режимів буріння, підвищення осьових навантажень, перепадів тиску та температур призводять до зростання рівня напружень, їх прискореного накопичення у конструктивних елементах двигуна [4, 6]. Особливістю роботи ГВД є наявність складного просторового контакту між ротором і еластомерною обіймою статора, який супроводжується орбітальним рухом ротора, змінними контактними напруженнями та циклічними деформаціями еластомеру [3, 9]. У процесі експлуатації в умовах підвищених температур і дії агресивних компонентів бурового розчину від-

бувається деградація фізико-механічних властивостей еластомерів, що проявляється у втраті пружності, утворенні тріщин, відшаруванні матеріалу та порушенні герметичності робочих камер [3, 4]. Одночасно металеві елементи ротора та корпусу зазнають втомного, корозійного й абразивного зношування, що в сукупності формує складну картину пошкоджуваності силової секції [2, 7].

Аналіз сучасних наукових досліджень свідчить про зростання інтересу до проблем моделювання напружено-деформованого стану елементів гвинтових машин, оцінювання контактних напружень у парі «ротор-статор», врахування термомеханічних ефектів та прогнозування ресурсу еластомерних матеріалів [4, 9]. Разом з тим більшість існуючих підходів орієнтовані або на гідравлічні характеристики двигуна, або на окремі аспекти матеріалознавства, без комплексного врахування впливу ускладнених умов буріння на формування напружено-деформованого стану всієї системи [4, 9].

Практика експлуатації показує, що передчасні відмови ГВД часто пов'язані не лише з перевищенням допустимих режимів роботи, а й із сукупною дією динамічних коливань, локальних перегрівів, нерівномірного розподілу контактного тиску та гідроабразивного впливу [2, 4, 6]. У похило-скерованих і горизонтальних свердловинах додатковим фактором є збільшені бокові навантаження, які змінюють характер взаємодії ротора і статора та сприяють виникненню локальних зон концентрації напружень [7, 8].

Таким чином, проблема аналізу напружено-деформованого стану гвинтових вибійних двигунів в ускладнених умовах буріння є актуальною як з наукової, так і з практичної точки зору [4, 6, 9]. Її розв'язання потребує системного підходу, що поєднує положення механіки деформівного твердого тіла, теорії контактної взаємодії, трибології та матеріалознавства з урахуванням реальних експлуатаційних факторів [2, 4, 9].

Висвітлення невирішених раніше частин загальної проблеми.

Сучасне буріння глибоких та горизонтальних свердловин супроводжується екстремальними навантаженнями, що призводять до інтенсивного накопичення пошкоджень у деталях силової секції гвинтових вибійних двигунів. Проте, на основі здійсненого літературного аналізу слід виділити частину науково-технічної проблеми, що вимагає проведення додаткових досліджень. Такою критичною

проблемою є деградація еластомерного статора та втомне руйнування ротора під дією циклічних деформацій, високих температур та агресивних бурових розчинів. Складний просторовий контакт у парі «ротор-статор» зумовлює нерівномірний розподіл напружень, що провокує локальні перегріву, відшарування матеріалу та явище «чункінгу» (В міжнародній практиці буріння чункінг - це процес руйнування еластомерного (гумового) покриття статора, при якому від нього відриваються цілі шматки або фрагменти) [4,3,6]. Існуючі наукові підходи часто розглядають гідравлічні чи матеріалознавчі аспекти окремо, не враховуючи комплексного впливу динамічних коливань та термомеханічної нестабільності на всю систему.

Формулювання цілей статті

У відповідності до зазначеної вище проблеми формулюємо мету дослідження, яка полягає в системній оцінці напружено-деформованого стану ГВД та пошкоджуваності його вузлів і деталей в ускладнених умовах буріння глибоких скерованих свердловин. Для реалізації сформульованої мети поставлено і завдання досліджень – проаналізувати основні механізми пошкоджуваності ГВД та встановити взаємозв'язок між параметрами напружено-деформованого стану силової секції і чинниками ускладнених умов буріння задля формування підґрунтя для підвищення довговічності та надійності роботи двигунів.

Висвітлення основного матеріалу дослідження

Конструктивні особливості гвинтових вибійних двигунів та умови їх навантаження

Гвинтовий вибійний двигун є гідромеханічною машиною об'ємного типу, принцип дії якої ґрунтується на перетворенні енергії потоку бурового розчину в механічну енергію обертання ротора [1, 8]. Основними конструктивними елементами ГВД є силова секція (статор та ротор), карданний вузол передачі руху, а також опорно-підшипниковий вузол з приводним валом [8]. Визначальну роль у формуванні експлуатаційних характеристик двигуна відіграє саме силова секція [6, 8].

Узагальнення даних про конструкцію ГВД показує, що їх робочі пари можуть мати різну конфігурацію (рис.2), а шпindelьні секції повинні забезпечувати високий крутний момент, плавність запуску й стабільну роботу в різних геолого-технічних умовах [8]. До важливих експлуатаційних переваг ГВД належать малі



Рисунок 1 – Типова конструкція гвинтового вибійного двигуна та його основні вузли [4]



Рисунок 2 – Конфігурації робочих пар [6]

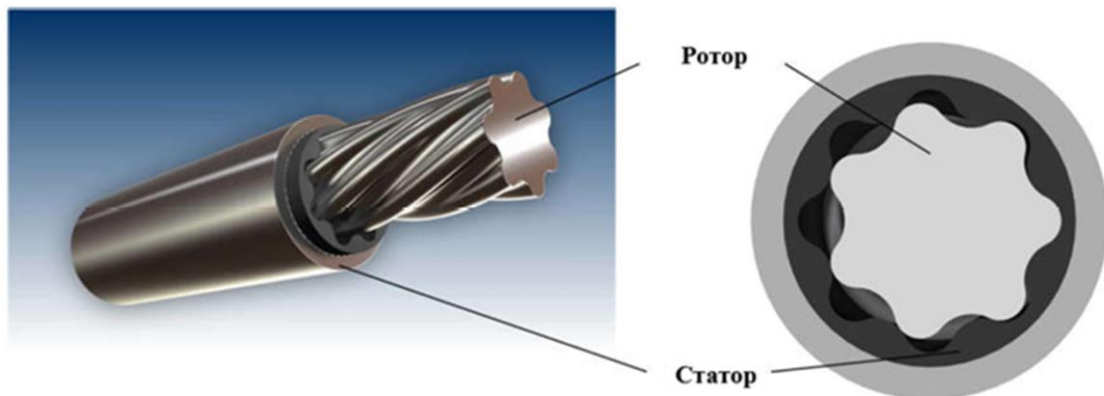


Рисунок 3 – Силова секція гвинтового вибійного двигуна [4]

осьові габаритні розміри, простота конструкції та ремонтпридатність, що особливо важливо під час буріння похило-скерованих і горизонтальних свердловин [1, 8]; водночас характерним недоліком є прискорене зношування силової секції та нагрівання статора внаслідок гістерезисних явищ [1, 9].

Силовa секція (рис. 3) складається зі сталевого ротора гвинтового профілю та статора, внутрішня поверхня якого виконана у вигляді гвинтової порожнини та вкрита еластомерною обіймою [1, 8]. Геометрія ротора і статора характеризується різницею числа заходів, що забезпечує утворення герметичних робочих камер змінного об'єму [8]. Під час прокачування бурового розчину ці камери переміщуються вздовж осі двигуна, викликаючи орбітальний рух ротора та його обертання навколо власної осі [8, 9].

Контакт між ротором і статором має складний просторовий характер і супроводжується нерівномірним розподілом контактного тиску [1, 9]. У зоні ліній контакту виникають локальні концентрації напружень, величина яких залежить від інтерференційної посадки ротора в еластомерній обіймі, перепаду тиску на двигуні, температури та фізико-механічних властивостей еластомеру [6] [9]. При цьому еластомер працює в умовах багатовісного напруженого стану, поєднання стиску, зсуву та циклічного розтягу, що зумовлює накопичення втомних пошкоджень [9].

Особливістю роботи ГВД є наявність значних осьових та крутних навантажень, які передаються від бурильної колони через двигун на долото [8]. Під час буріння величина осьового навантаження на долото може змінюватися в широких межах, що призводить до коли-

вань крутного моменту та виникнення динамічних перевантажень [8]. Додатково в похило-скерованих і горизонтальних свердловинах на корпус двигуна діють поперечні сили, обумовлені контактом компоновки з стінками свердловини [1, 6]. Це спричиняє зміну умов контакту в парі «ротор-статор» та формування асиметричного напружено-деформованого стану [9].

Суттєвий вплив на роботу ГВД має температурний режим. Підвищення температури у вибійній зоні, яке може досягати 120-150 °С і більше, викликає зміну жорсткісних характеристик еластомеру, зниження його модуля пружності та прискорення процесів термоокиснювальної деградації [6, 9]. Одночасно відбувається інтенсивне гістерезисне тепловиділення внаслідок циклічних деформацій матеріалу статора [1, 9]. Локальний перегрів може призводити до втрати герметичності робочих камер, зниження крутного моменту та розвитку тріщин в еластомерному шарі [1, 6, 9].

Гідравлічні навантаження також є визначальним фактором. Перепад тиску на двигуні безпосередньо пов'язаний з величиною крутного моменту, що розвивається ротором [6, 8]. Збільшення перепаду тиску підвищує контактні напруження в зоні спряження, а при перевищенні допустимих значень може спричинити перевантаження еластомеру, його локальне руйнування або явище «чункінгу» (відриву фрагментів матеріалу) [6, 9].

Крім того, в умовах реального буріння ГВД працює під дією вібрацій різної природи – осьових, крутильних та поперечних [6]. Вібраційні процеси посилюють мікропереміщення в зоні контакту ротора і статора, сприяють розвитку фретингових пошкоджень та прискорюють втому матеріалів [1, 6]. Динамічний характер навантаження особливо проявляється при зміні режимів буріння, проходженні інтервалів з різною міцністю порід та під час виникнення прихоплень або короткочасних зупинок обертання [6].

Таким чином, конструктивні особливості гвинтових вибійних двигунів у поєднанні з комплексом механічних, гідравлічних, температурних і динамічних впливів формують складний багатофакторний напружено-деформований стан елементів силової секції [1, 6, 8, 9]. Саме ці умови визначають характер і швидкість накопичення пошкоджень, що потребує детального аналізу механізмів деградації ГВД в ускладнених умовах буріння [1, 6, 9].

Основні механізми пошкоджуваності гвинтових вибійних двигунів

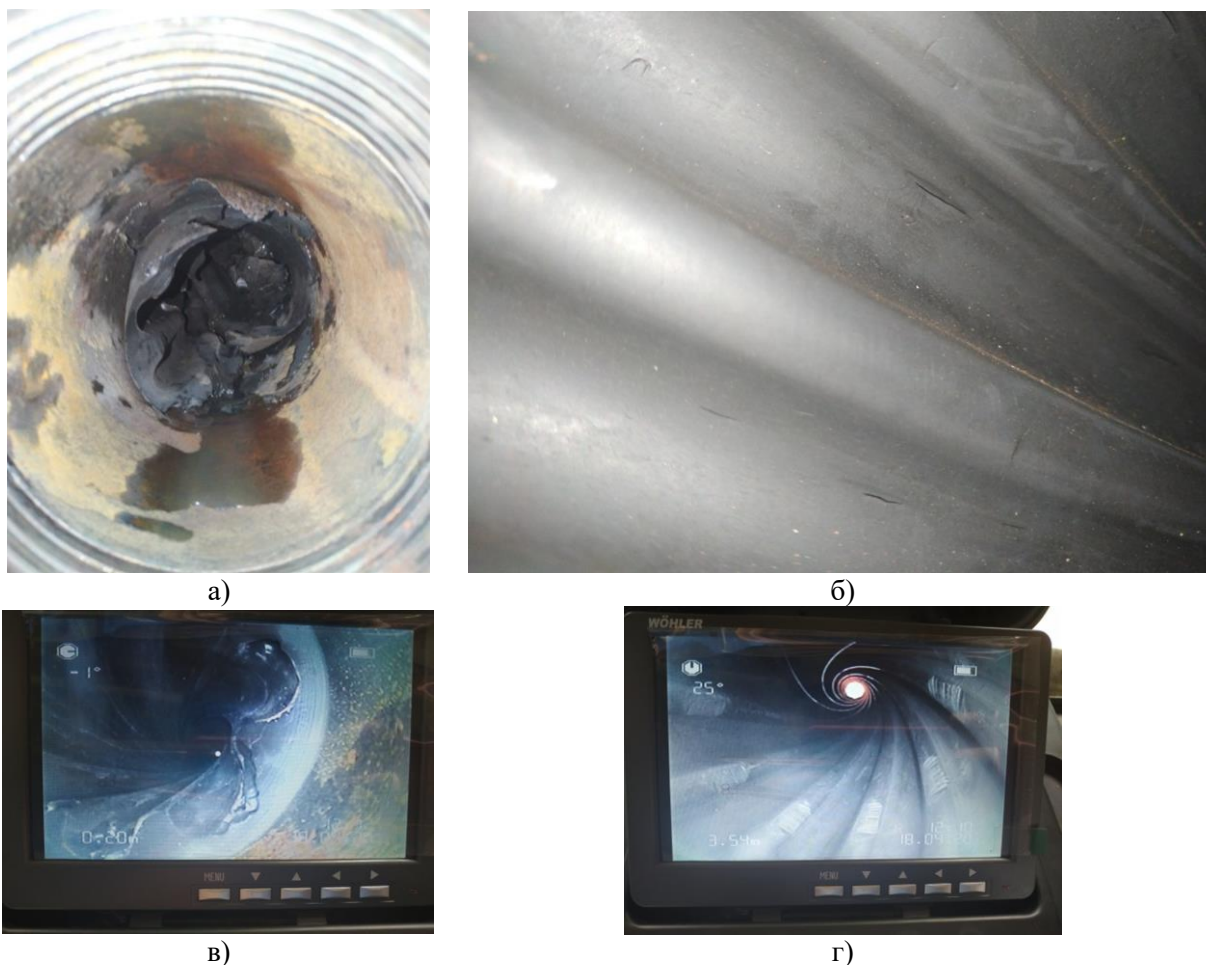
Експлуатаційна надійність гвинтових вибійних двигунів визначається стійкістю їх конструктивних елементів до дії складного комплексу механічних, гідравлічних, температурних і хімічних навантажень. У реальних умовах буріння пошкоджуваність ГВД має багатофакторний характер і формується внаслідок одночасного протікання кількох деградаційних процесів, які взаємно підсилюють один одного. Основними механізмами руйнування є: втомне та контактне пошкодження металевих елементів, деградація еластомерного статора, гідроабразивне зношування, термомеханічна нестабільність та фретингові процеси в зоні спряження [2, 6, 11].

Основні механізми пошкоджуваності еластомерної обойми статора

Еластомерна обойма статора працює в умовах багатовісного напруженого стану, що поєднує стиск, зсув та циклічну деформацію внаслідок орбітального руху ротора. У зоні контактної взаємодії формуються локальні напруження, які змінюються з частотою обертання двигуна. Таке циклічне навантаження спричиняє накопичення втомних пошкоджень у структурі матеріалу, розвиток мікротріщин та поступову втрату еластичності [2, 6]. Додатковим фактором є гістерезисне тепловиділення, що виникає внаслідок внутрішнього тертя в еластомері під час деформацій. За підвищених температур відбувається зниження модуля пружності, прискорення процесів старіння та окиснювальної деградації матеріалу [6, 11]. У поєднанні з впливом агресивних компонентів бурового розчину це призводить до набухання, розм'якшення або, навпаки, крихкого руйнування еластомерної обойми. Типовими проявами деградації є утворення тріщин вздовж гвинтового профілю, відшарування матеріалу від металевого корпусу статора, локальне викришування (чункінг) та порушення геометрії робочих камер (рис. 4). Втрата герметичності спричиняє зниження перепаду тиску, падіння крутного моменту та зменшення ефективності роботи двигуна [2, 6].

Контактно-втомне пошкодження ротора

Сталевий ротор піддається дії змінних контактних напружень у зоні ліній спряження зі статором. Нерівномірний розподіл тиску та наявність локальних зон концентрації напружень сприяють розвитку контактної втоми



а) відшарування матеріалу від металевого корпусу статора; б) тріщини; в) локальне викривування (чункінг); г) порушення геометрії робочих камер (фото зроблено співавтором власноруч)

Рисунок 4 – Типові прояви деградації статора

поверхневого шару металу. У процесі тривалої експлуатації на поверхні ротора можуть формуватися мікропластичні деформації, вибоїни, задири та тріщини [2, 11]. Особливо небезпечними є режими, пов'язані з перевантаженням двигуна або його роботою в умовах недостатнього охолодження. Підвищення температури знижує границю витривалості металу та прискорює розвиток втомних тріщин [6]. За наявності агресивного середовища можливий розвиток корозійно-втомних процесів, що додатково зменшує довговічність ротора.

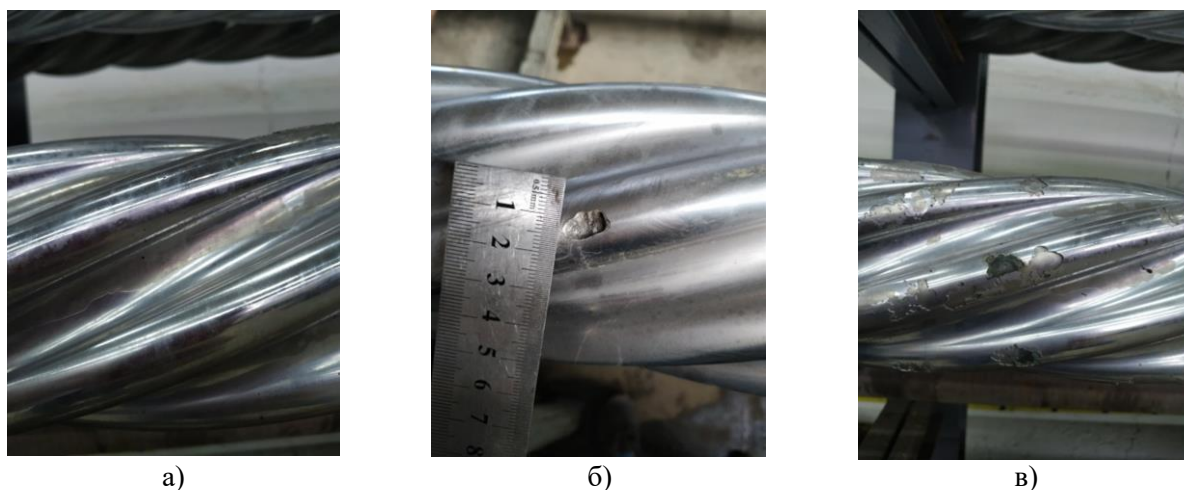
Гідраабразивне зношування

Буровий розчин, який циркулює через силову секцію, часто містить тверді частинки шламу та абразивні включення. Потік із високою швидкістю спричиняє ерозійне зношування поверхонь ротора та статора, особливо в зонах підвищеної турбулентності. Гідраабразивний вплив призводить до поступового зменшення товщини еластомерного шару, зміни профілю робочих камер та порушення контак-

тної геометрії. Інтенсивність ерозійного зношування залежить від швидкості потоку, концентрації твердих частинок, їх розміру та мінералогічного складу. У поєднанні з механічним навантаженням це формує комплексний механізм деградації поверхонь [2, 11].

Термомеханічна нестабільність

Поєднання механічних навантажень і підвищених температур призводить до розвитку термомеханічних напружень у матеріалах силової секції. Різниця коефіцієнтів теплового розширення металу ротора та еластомерної обійми статора зумовлює зміну інтерференційної посадки та перерозподіл контактного тиску. За певних умов це може викликати як надмірне ущільнення, так і втрату герметичності камер. Термомеханічна нестабільність особливо проявляється при різких змінах режимів роботи – зупинках циркуляції, повторному запуску двигуна або переході до інтенсивних режимів буріння. Такі цикли нагрівання-охолодження сприяють накопиченню залиш-



а) мікропластичні деформації; б) вибоїни; в) тріщини, котрі перетворились в задири

Рисунок 5 – Втоми поверхневого шару металу ротора
(фото зроблено співавтором власноруч)

кових деформацій та розвитку тріщин у матеріалах [2, 6].

Вплив динамічних коливань і фретингові процеси

Вібрації осевого, крутильного та поперечного характеру, що виникають під час буріння, змінюють характер взаємодії ротора і статора. Мікропереміщення в зоні контакту можуть призводити до розвитку фретингових пошкоджень поверхневих шарів. Ці процеси супроводжуються руйнуванням мікроконтактів, локальним підвищенням температури та утворенням продуктів зношування, які посилюють абразивний вплив [2, 7]. Динамічні перевантаження, зокрема під час прихоплення або різких змін навантаження на долото, можуть викликати короткочасне перевищення допустимих контактних напружень, що спричиняє локальні руйнування еластомерної обойми або пластичні деформації металевих елементів [6, 7].

Таким чином, пошкоджуваність ГВД є результатом комплексної дії контактно-втомних, термомеханічних, гідроабразивних і хімічних процесів, інтенсивність яких визначається параметрами напружено-деформованого стану та умовами експлуатації силової секції. Застосування механізмів розвитку пошкоджуваностей є необхідною передумовою для формування підходів до прогнозування ресурсу та підвищення надійності ГВД.

Пошкодження шпindelного вузла ГВД

Шпindelний вузол гвинтового вибійного двигуна призначений для сприйняття осевих і радіальних навантажень та передачі оберталь-

ного моменту на долото, тому його технічний стан безпосередньо визначає працездатність усього двигуна [8]. Це підтверджується тим, що в сучасних дослідженнях з підвищення довговічності ГВД окремо виділяються задачі аналізу та оптимізації зношування підшипників, а також конструктивного вдосконалення упорних підшипникових вузлів [5, 10]. За тривалої роботи в ускладнених умовах буріння в підшипниковій частині можуть розвиватися контактно-втомні пошкодження, зростання контактних напружень у зонах спряження та прискорене зношування елементів кочення [5]. Додатково деградацію підшипникової секції посилюють абразивні частинки бурового розчину, динамічні перевантаження та порушення теплового режиму, що в сукупності може призводити до передчасної втрати несучої здатності вузла й відмови ГВД [10].

Вплив ускладнених умов буріння на формування напружено-деформованого стану гвинтових вибійних двигунів

Ускладнені умови буріння істотно змінюють характер навантаження гвинтових вибійних двигунів та формують специфічний напружено-деформований стан їх елементів. До таких умов належать значні глибини свердловин, підвищені температури, великі перепади тиску, похило-скеровані та горизонтальні профілі, наявність агресивних компонентів бурового розчину, а також інтенсивні динамічні коливання. Сукупна дія зазначених факторів призводить до багатовісного, нерівномірного та змінного в часі напруженого стану силової секції ГВД [4, 8, 9].

Вплив осьових і крутних навантажень

В умовах глибокого буріння осьове навантаження на долото може досягати значних величин, що спричиняє відповідне зростання реактивного крутного моменту на двигуні. Збільшення перепаду тиску через силову секцію супроводжується підвищенням контактних напружень у зоні спряження ротора і статора. Нерівномірність розподілу крутного моменту по довжині силовій секції формує локальні зони підвищеного контактного тиску. У цих зонах еластомер зазнає значних зсувних деформацій, що призводить до накопичення втомних пошкоджень. Металевий ротор, у свою чергу, працює в умовах циклічного згину та кручення, що сприяє розвитку контактної-втомних тріщин [4, 9].

Бокові навантаження в похило-скерованих і горизонтальних свердловинах

У похило-скерованих і горизонтальних інтервалах свердловин компоновка низу бурильної колони взаємодіє зі стінками стовбура, що спричиняє виникнення додаткових поперечних сил. Ці сили передаються на корпус двигуна і змінюють характер взаємодії в парі «ротор-статор» [8]. Асиметричне навантаження призводить до зміщення ротора відносно геометричної осі статора та формування нерівномірного контактного тиску по периметру гвинтового профілю. Внаслідок цього напружено-деформований стан еластомерної обойми стає просторово неоднорідним, що прискорює локальну деградацію матеріалу. У крайніх випадках можливе часткове перевантаження окремих ділянок силовій секції з утворенням зон інтенсивного зношування [4, 9].

Температурні впливи

Підвищення температури на вибої суттєво впливає на фізико-механічні властивості матеріалів ГВД. Еластомер статора характеризується температурною залежністю модуля пружності, коефіцієнта теплового розширення та границі міцності (рис. 6). Зі зростанням температури зменшується жорсткість матеріалу, що змінює інтерференційну взаємодію ротора і статора. Різниця коефіцієнтів теплового розширення металу та еластомеру викликає перерозподіл контактного тиску вздовж профілю. За певних температур можливе або надмірне ущільнення, що спричиняє перевантаження еластомеру, або зменшення притиску, що призводить до втрати герметичності робочих камер. Повторювані цикли нагрівання та охолодження формують додаткові термомеханічні

напруження та сприяють накопиченню залишкових деформацій [4, 9].

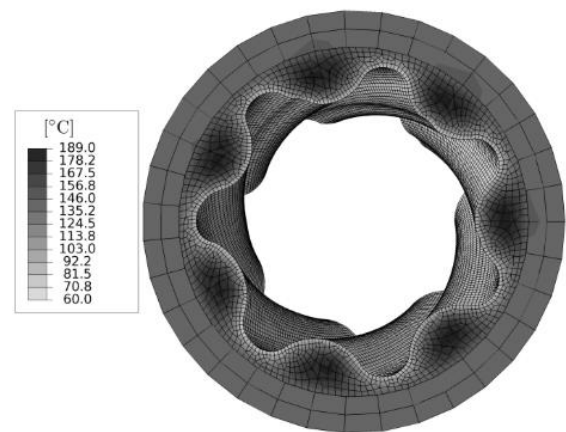


Рисунок 6 – Приклад розподілу температури в середині статора ГВД [9]

Гідравлічні фактори та перепади тиску

Перепад тиску на двигуні є визначальним параметром його навантаження. Зі збільшенням витрати бурового розчину та опору руйнуванню породи зростає гідравлічний тиск у робочих камерах, що безпосередньо впливає на величину контактного тиску між ротором і статором.

Нерівномірність гідродинамічних процесів, наявність турбулентних зон і локальних перепадів тиску формують додаткові навантаження на еластомерну обойму. У поєднанні з механічними напруженнями це створює складний тривимірний напружено-деформований стан, який важко оцінити без застосування числового моделювання [4, 10].

Динамічні навантаження та коливання

Під час буріння виникають осьові, крутильні та поперечні коливання, які можуть мати резонансний характер. Крутильні коливання типу «stick-slip» призводять до періодичних перевантажень двигуна, що супроводжуються різкими змінами крутного моменту. Осьові коливання викликають зміну контактного тиску в силовій секції, а поперечні – сприяють додатковому зміщенню ротора. Динамічний характер навантаження формує циклічні зміни напружень, що істотно скорочує довговічність матеріалів за механізмом втоми. При цьому амплітудно-частотні характеристики коливань визначають швидкість накопичення пошкоджень. Таким чином, ускладнені умови буріння формують багатofакторний, просторово неоднорідний і змінний у часі напружено-деформований стан гвинтових вибійних двигунів. Саме характер і рівень цього стану ви-

значають інтенсивність деградаційних процесів у силовій секції та є ключовим об'єктом дослідження при оцінюванні довговічності ГВД [4, 8-10].

Вплив прихоплень на напружено-деформований стан гвинтового вибійного двигуна

Одним із найбільш небезпечних ускладнень під час буріння є прихоплень бурильної колони, що супроводжується частковим або повним блокуванням її переміщення у свердловині. У випадку розміщення гвинтового вибійного двигуна в зоні прихоплень або поблизу неї формується критичний напружено-деформований стан його елементів. Під час прихоплення двигун піддається різкому зростанню осьових і крутних навантажень [11, 12, 13]. У разі спроб звільнення інструменту шляхом прикладання додаткового моменту або осьового зусилля в силовій секції виникають перевищення розрахункових контактних напружень. Ротор може частково або повністю втратити здатність до вільного орбітального руху, що спричиняє локальне перевантаження еластомерної обойми. За умов заклинювання або обмеженого обертання ротора в статорі виникає режим квазістатичного перевантаження, при якому контактний тиск у зоні спряження різко зростає. Це може призводити до:

- локального зсуву та розриву еластомеру;
- явища «чункінгу» (відриву фрагментів статора);
- пластичної деформації поверхневого шару ротора;
- різкого локального перегріву внаслідок внутрішнього тертя.

Особливо небезпечним є поєднання прихоплень з продовженням циркуляції бурового розчину. У цьому випадку гідравлічний перепад тиску зберігається або зростає, тоді як механічний рух обмежений. Це створює умови для різкого підвищення температури в робочих камерах та прискореної термомеханічної деградації еластомерної обойми.

У похило-скерованих та горизонтальних свердловинах додаткову роль відіграють сили тертя між корпусом двигуна та стінками свердловини. При диференційному прихопленні або механічному заклинюванні компоновки виникають поперечні навантаження, що призводять до згину корпусу ГВД. У таких умовах формується комбінований напружений стан – поєднання згину, кручення та локального контактного тиску в силовій секції. Асиметрія навантаження спричиняє нерівномірний роз-

поділ контактного тиску по периметру ротора та прискорене руйнування окремих ділянок статора. Динамічні удари, що виникають під час різких спроб звільнення інструменту (ударне розвантаження, розгойдування), формують імпульсні перевантаження, які можуть перевищувати допустимі межі міцності матеріалів [14, 15, 16]. У таких режимах реалізується механізм малоциклової втоми металевих елементів і крихкого руйнування еластомеру.

Таким чином, прихоплення є екстремальним режимом роботи гвинтового вибійного двигуна, при якому напружено-деформований стан силовій секції переходить у область граничних значень. Накопичені під час таких епізодів пошкодження часто мають прихований характер і можуть проявлятися у вигляді передчасного виходу двигуна з ладу під час подальшої експлуатації. Урахування впливу прихоплень при аналізі НДС ГВД є необхідною умовою для адекватного прогнозування ресурсу двигуна та розроблення заходів щодо підвищення його надійності в ускладнених умовах буріння.

Напрями підвищення довговічності та надійності гвинтових вибійних двигунів в ускладнених умовах буріння

Комплексний аналіз механізмів пошкоджуваності гвинтових вибійних двигунів свідчить, що підвищення їх довговічності можливе лише за умови системного підходу, який поєднує конструктивні, матеріалознавчі, технологічні та експлуатаційні рішення. Врахування особливостей формування напружено-деформованого стану силовій секції дозволяє визначити ключові напрями підвищення надійності ГВД.

Одним із ефективних шляхів зниження інтенсивності контактних напружень є оптимізація геометрії гвинтового профілю ротора та статора, а також раціональний вибір величини інтерференційної посадки. Надмірна інтерференція призводить до підвищеного контактного тиску і перегріву еластомеру, тоді як недостатня – до втрати герметичності робочих камер і зменшення крутного моменту. Застосування чисельно-імітаційного моделювання, зокрема методу скінченних елементів, дає змогу оцінити розподіл напружень у силовій секції з урахуванням реальних граничних умов, температурного впливу та перепаду тиску [17, 18]. Це дозволяє визначати зони концентрації напружень і коригувати конструктивні параметри ще на етапі проектування.

Удосконалення матеріалів еластомерної обійми

Зважаючи на ключову роль еластомерного статора у формуванні ресурсу двигуна, важливим напрямом є застосування матеріалів із підвищеною термостійкістю, зносостійкістю та стійкістю до агресивних компонентів бурових розчинів. Перспективним є використання модифікованих еластомерів із поліпшеними характеристиками втомної міцності та зниженим рівнем гістерезисного тепловиділення. Особливу увагу слід приділяти адгезії еластомеру до металевого корпусу статора, оскільки відшарування матеріалу є однією з поширених причин передчасного виходу ГВД з ладу. Оптимізація технології вулканізації та підготовки поверхні корпусу дозволяє підвищити надійність з'єднання.

Контроль режимів буріння та запобігання перевантаженням

Зменшення інтенсивності пошкоджень можливе шляхом оптимізації режимів буріння, зокрема обмеження перепаду тиску на двигуні, контролю осьового навантаження та запобігання тривалим режимам перевантаження. Важливим є своєчасне виявлення крутильних коливань типу «stick-slip» та їх мінімізація за допомогою коригування параметрів обертання та подачі. Запобігання прихопленням та зменшення їх наслідків є окремим напрямом підвищення надійності. Раціональний вибір компоновки, контроль параметрів бурового розчину, зниження сил тертя між компоновкою та стінками свердловини дозволяють зменшити ймовірність виникнення екстремальних напружених станів у ГВД.

Діагностика та прогнозування ресурсу

Сучасні підходи до підвищення довговічності передбачають впровадження систем моніторингу технічного стану двигуна на основі аналізу параметрів тиску, крутного моменту, температури та вібрацій. Обробка цих даних дає можливість виявляти відхилення від номінальних режимів та прогнозувати залишковий ресурс силової секції.

Поєднання результатів чисельно-імітаційного моделювання напружено-деформованого стану з експлуатаційними даними створює підґрунтя для розроблення моделей прогнозування довговічності, що враховують реальні ускладнені умови буріння [19, 20]. Таким чином, підвищення надійності гвинтових вибійних двигунів потребує комплексного врахування особливостей формування напружено-

деформованого стану, впливу ускладнених умов буріння та реалізації заходів щодо оптимізації конструкції, матеріалів і режимів експлуатації. Запропоновані напрями можуть бути використані як на етапі проектування, так і під час практичної експлуатації ГВД.

Висновки

Встановлено, що пошкоджуваність гвинтових вибійних двигунів в ускладнених умовах буріння має багатофакторний характер і зумовлена сукупною дією осьових, крутильних, поперечних, гідравлічних та температурних навантажень, які формують складний і просторово неоднорідний напружено-деформований стан силової секції. Показано, що ключовими механізмами деградації ГВД є втомно-термомеханічне руйнування еластомерної обійми статора, контактнo-втомне пошкодження поверхні ротора, гідроабразивне зношування та фретингові процеси, інтенсивність яких визначається рівнем контактних напружень і характером динамічних коливань. Обґрунтовано, що у похило-скерованих і горизонтальних свердловинах додаткові поперечні навантаження та асиметрія контакту призводять до нерівномірного розподілу контактного тиску в парі «ротор-статор», що прискорює локальну деградацію еластомеру та формування зон концентрації напружень. Встановлено, що прихвати бурильної колони є екстремальним режимом роботи ГВД, при якому напружено-деформований стан елементів силової секції переходить у область граничних значень, що спричиняє локальні перевантаження, термомеханічну нестабільність та різке скорочення ресурсу двигуна. Підтверджено доцільність застосування чисельно-імітаційного моделювання напружено-деформованого стану, зокрема методу скінченних елементів, для оцінювання контактних напружень у силівій секції з урахуванням температурного впливу, перепаду тиску та динамічних факторів. Визначено, що підвищення довговічності та надійності гвинтових вибійних двигунів можливе за умови комплексного підходу, який передбачає оптимізацію геометрії силової секції, удосконалення еластомерних матеріалів, контроль режимів буріння та впровадження систем моніторингу технічного стану.

Подяки

Відсутні.

Конфлікт інтересів

Відсутній.

Список використаних джерел

1. Biletskyi V., Landar S., Mishchuk Y. Modeling of the power section of downhole screw motors. *Mining of Mineral Deposits*. 2017. Vol. 11, No. 3. P. 15–22. DOI: <https://doi.org/10.15407/mining11.03.015>.
2. Examining the current of drilling mud in a power section of the screw down-hole motor / V. Biletskyi et al. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2018. No. 2/5 (92). P. 41–47. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.126230>.
3. Izadi M., Tabatabaee Ghomi M., Pircheraghi G. Mechanical strength improvement of mud motor's elastomer by nano clay and prediction the working life via strain energy. *International Journal of Engineering*. 2019. Vol. 32, No. 2. P. 338–345. DOI: <https://doi.org/10.5829/ije.2019.32.02b.20>.
4. Kolyshkin A. Predicting mud motor performance and reliability with reduced order modeling. 14th World Congress in Computational Mechanics (WCCM); ECCOMAS Congress 2020 / eds. F. Chinesta, R. Abgrall, O. Allix, M. Kaliske. Virtual Congress, 11–15 January 2021. URL https://www.scipedia.com/wd/images/7/79/Draft_Content_668595009p2816.pdf
5. Kuang Y., Zhou J. Performance evaluation for positive displacement motors by combining FSI simulations and experiments. *Preprint*. 2024. DOI: <https://doi.org/10.2118/223929-PA>
6. Lawal T. O. Mud Motor Failure Analysis Using Surface Sensor Data: Features and Trends: master's thesis. The University of Texas at Austin, 2020. URL <https://repositories.lib.utexas.edu/items/76216624-f7a4-45a3-a8dd-c7a9e247dc45>
7. Li F., Song H., Wang Y. Drilling dynamics measurement of drilling motors and its application in recognition of motor operation states through machine learning. *Petroleum*. 2024. Vol. 10. P. 608–619. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.petlm.2024.06.003>.
8. Орловський В. М., Білецький В. С., Вітрик В. Г., Сіренко В. І. Бурове і технологічне обладнання. ХНУМГ ім. О. М. Бекетова; НТУ «ХП»; Новий Світ–2000.
9. Constitutive modeling and FE-simulation of temperature dependent stator elastomers in positive displacement motors / A. Schöne et al. Constitutive Models for Rubber XIII: Proceedings of the 13th European Conference on Constitutive Models for Rubbers (ECCMR 2024). Istanbul, 2024. P. 66–71. DOI: <https://doi.org/10.1201/9781003516880>.
10. Research on erosion damage laws and structural optimization of bypass valve for positive displacement motors / Y. Zhang et al. *Processes*. 2024. Vol. 12. Article 1953. DOI: <https://doi.org/10.3390/pr12091953>.
11. Experimental research of drilling mud influence on mud motor mechanical rubber components / A. V. Epikhin et al. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2015. Vol. 27. 012051. DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/27/1/012051>.
12. WZL Motor Handbook. 4th ed. Wenzel Downhole Tools, 2013.
13. Navi-Drill Motor Handbook. 15th ed. Baker Hughes, 2020.
14. Syzrantseva K., Syzrantsev V. Load on Multipair Contact Zones of Operating Parts of Screw Pumps and Motors: A Computer Analysis. *Procedia Engineering*. 2016. Vol. 150. P. 768–774. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.07.104>.
15. Real-Time Fatigue Risk Assessment of BHA Connectors Using Combined Physics and Data-Driven Approach / D. Belov et al. Annual Conference of the Prognostics and Health Management Society. 2025.
16. Kanzenbach L., Lehmann T., Ihlemann J. Digital image correlation-based characterization of rubber material at large shear deformations in an extended temperature range. *GAMM-Mitteilungen*. 2022.
17. Dvoynikov M., Kunshin A., Blinov P., Morozov V. Development of Mathematical Model for Controlling Drilling Parameters with Screw Downhole Motor. *International Journal of Engineering*. 2020. Vol. 33, no. 7. P. 1423–1430. DOI: [10.5829/ije.2020.33.07a.30](https://doi.org/10.5829/ije.2020.33.07a.30)
18. Structural Design and Numerical Analysis of an All-Metal Screw Motor for Drilling Applications in High-Temperature and High-Pressure Environments in Ultra-Deep Wells / Xin Fang et al. *Applied Sciences*. 2023. Vol. 13, no. 15. Art. 8630. DOI: <https://doi.org/10.3390/app13158630>
19. Buslaev G. V., Konoplyannikov A. V. Mathematical Modeling of a Hydro-mechanical System with a Positive Displacement Motor and Hydraulic Thruster to Optimize the Drilling process for Extended-reach Drilling Wells. *International Journal of Engineering*. 2026. Vol. 39, no. 5. P. 1077–1087. DOI <https://doi.org/10.5829/ije.2026.39.05b.03>

20. Aribowo A. G. Dynamic Modeling and Performance Analysis of Rotary Drilling Systems with a Downhole Passive Regulator : proefschrift / Eindhoven University of Technology. Eindhoven, 2024. 214 p. URL: https://tomax.no/content/uploads/2025/03/2024_PhDThesis_ArviandyAribowo_sub.pdf

References

1. Biletskyi, V., Landar, S., & Mishchuk, Y. (2017). Modeling of the power section of downhole screw motors. *Mining of Mineral Deposits*, 11(3), 15–22. <https://doi.org/10.15407/mining11.03.015>
2. Biletskyi, V., Vitryk, V., Mishchuk, Y., Fyk, M., Dzhus, A., Kovalchuk, Yu., Romanyshyn, T., & Yurych, A. (2018). Examining the current of drilling mud in a power section of the screw down-hole motor. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, (2/5 (92)), 41–47. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.126230>
3. Izadi, M., Tabatabaee Ghomi, M., & Pircheraghi, G. (2019). Mechanical strength improvement of mud motor's elastomer by nano clay and prediction the working life via strain energy. *International Journal of Engineering*, 32(2), 338–345. <https://doi.org/10.5829/ije.2019.32.02b.20>
4. Kolyshkin, A. (2021). Predicting mud motor performance and reliability with reduced order modeling. In F. Chinesta, R. Abgrall, O. Allix, & M. Kaliske (Eds.), *14th World Congress in Computational Mechanics (WCCM); ECCOMAS Congress 2020*. Scipedia. https://www.scipedia.com/wd/images/7/79/Draft_Content_668595009p2816.pdf
5. Kuang, Y., & Zhou, J. (2024). *Performance evaluation for positive displacement motors by combining FSI simulations and experiments* [Preprint]. SPE. <https://doi.org/10.2118/223929-PA>
6. Lawal, T. O. (2020). *Mud motor failure analysis using surface sensor data: Features and trends* [Master's thesis, The University of Texas at Austin]. UT Electronic Theses and Dissertations. <https://repositories.lib.utexas.edu/items/76216624-f7a4-45a3-a8dd-c7a9e247dc45>
7. Li, F., Song, H., & Wang, Y. (2024). Drilling dynamics measurement of drilling motors and its application in recognition of motor operation states through machine learning. *Petroleum*, 10(4), 608–619. <https://doi.org/10.1016/j.petlm.2024.06.003>
8. Orlovskiy, V. M., Biletskyi, V. S., Vitryk, V. H., & Sirenko, V. I. (2021). *Burove i tekhnologichne obladnannia* [Drilling and technological equipment]. KhNUMH im. O. M. Beketova; NTU “KhPI”; Novyi Svit–2000. (in Ukrainian)
9. Schöne, A., Landgraf, R., Ihlemann, J., Zeller, S., Hohl, C., & Regener, T. (2024). Constitutive modeling and FE-simulation of temperature dependent stator elastomers in positive displacement motors. In *Constitutive Models for Rubber XIII: Proceedings of the 13th European Conference on Constitutive Models for Rubbers (ECCMR 2024)* (pp. 66–71). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781003516880>
10. Zhang, Y., Zhang, L., Gao, Y., Shi, P., Wang, Y., & Kong, L. (2024). Research on erosion damage laws and structural optimization of bypass valve for positive displacement motors. *Processes*, 12(9), Article 1953. <https://doi.org/10.3390/pr12091953>
11. Epikhin, A. V., Ushakov, A. V., Barztaikin, V. V., Melnikov, V. V., & Ulyanova, O. S. (2015). Experimental research of drilling mud influence on mud motor mechanical rubber components. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 27(1), Article 012051. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/27/1/012051>
12. Wenzel Downhole Tools. (2013). *WZL motor handbook* (4th ed.). Wenzel Downhole Tools.
13. Baker Hughes. (2020). *Navi-Drill motor handbook* (15th ed.). Baker Hughes.
14. Syzrantseva, K., & Syzrantsev, V. (2016). Load on multipair contact zones of operating parts of screw pumps and motors: A computer analysis. *Procedia Engineering*, 150, 768–774. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.07.104>
15. Belov, D., Chen, W., Gilliam, J., & Wang, Y. (2025). Real-time fatigue risk assessment of BHA connectors using combined physics and data-driven approach. *Annual Conference of the Prognostics and Health Management Society*.
16. Kanzenbach, L., Lehmann, T., & Ihlemann, J. (2022). Digital image correlation-based characterization of rubber material at large shear deformations in an extended temperature range. *GAMM-Mitteilungen*, 45(3-4), Article e202200017. <https://doi.org/10.1002/gamm.202200017>
17. Dvoynikov, M., Kunshin, A., Blinov, P., & Morozov, V. (2020). Development of mathematical model for controlling drilling parameters with screw downhole motor. *International Journal of Engineering*, 33(7), 1423–1430. <https://doi.org/10.5829/ije.2020.33.07a.30>

18. Fang, X., Zhang, C., Li, C., Chen, L., Li, J., Yang, X., & Xie, H. (2023). Structural design and numerical analysis of an all-metal screw motor for drilling applications in high-temperature and high-pressure environments in ultra-deep wells. *Applied Sciences*, 13(15), Article 8630. <https://doi.org/10.3390/app13158630>

19. Buslaev, G. V., & Konoplyannikov, A. V. (2026). Mathematical modeling of a hydro-mechanical system with a positive displacement motor and hydraulic thruster to optimize the drilling process for extended-reach drilling wells. *International Journal of Engineering*, 39(5), 1077–1087. <https://doi.org/10.5829/ije.2026.39.05b.03>

20. Aribowo, A. G. (2024). *Dynamic modeling and performance analysis of rotary drilling systems with a downhole passive regulator* [Doctoral dissertation, Eindhoven University of Technology]. TU/e Repository. https://tomax.no/content/uploads/2025/03/2024_PhDThesis_ArviandyAribowo_sub.pdf

ANALYSIS OF DAMAGE ACCUMULATION IN POSITIVE DISPLACEMENT MUD MOTORS UNDER COMPLICATED DRILLING CONDITIONS

Rudenko O. O.

Postgraduate Student

Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas

15 Karpatska St., Ivano-Frankivsk, 76019, Ukraine

<https://orcid.org/0009-0003-2765-5402>

e-mail: alexsanrd2a@gmail.com

Grydzhuk Ya. S.

Doctor of Technical Sciences, Professor

Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas

15 Karpatska St., Ivano-Frankivsk, 76019, Ukraine

<http://orcid.org/0000-0002-1429-8640>

e-mail: jaroslav.gridzhuk@gmail.com

Slabyi O. O.

PhD in Technical Sciences, Associate Professor

Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas

15 Karpatska St., Ivano-Frankivsk, 76019, Ukraine

<http://orcid.org/0000-0002-1274-2875>

e-mail: burewisnyk@gmail.com

Deineha R. O.

PhD in Technical Sciences, Associate Professor

Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas

15 Karpatska St., Ivano-Frankivsk, 76019, Ukraine

<http://orcid.org/0000-0003-1141-7672>

e-mail: ruslan.deineha@nung.edu.ua

Mykytii I. M.

PhD in Technical Sciences, Associate Professor

Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas

15 Karpatska St., Ivano-Frankivsk, 76019, Ukraine

<http://orcid.org/0000-0002-8925-6349>

e-mail: ivan.mykytii@nung.edu.ua

Abstract. Under modern conditions of deep, directional and horizontal drilling, positive displacement mud motors operate under increased axial, torsional and lateral loads, dynamic vibrations, temperature effects and aggressive drilling fluids. This causes accelerated damage accumulation in the motor power section, including elastomer stator degradation, rotor fatigue failure, contact damage development and loss of sealing in working chambers. The purpose of this paper is to analyze the main damage mechanisms of positive displacement mud motors under complicated drilling conditions and to determine the relation between operational factors and the technical state of power section elements. The study is based on analytical review of scientific publications, generalization of field data, and concepts of solid mechanics and tribology. It is established that the main factors influencing motor durability are variable contact stresses in the rotor-stator pair, cyclic deformation of the elastomer, local overheating, abrasive action of solid particles in drilling mud, and overloads during drilling. The paper proves the need for a complex account of mechanical, thermal and hydraulic factors when evaluating motor life. The obtained results can be used for life prediction of mud motors, drilling mode optimization, and improvement of drilling tool reliability.

Keywords: positive displacement mud motor; power section; rotor; stator; stress-strain state; damage accumulation; durability.