

## **ДОСЛІДЖЕННЯ З'ЄДНАНЬ ВУГЛЕПЛАСТИКОВИХ СТРИЖНІВ ЗІ СТАЛЕВИМИ ГОЛОВКАМИ ПРИ ДІЇ НАВАНТАЖЕНЬ ЗГИНУ**

**Б. В. Копей, В. В. Михайлюк, Б.М. Бакун**

*ІФНТУНГ; 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел.(0342)727101;  
e-mail: kopeyb@ukr.net*

Для підвищення ефективності використання штангової свердловинної насосної установки (ШСНУ) сьогодні застосовують колони насосних штанг, виготовлених з і склопластика та вуглепластика. Такі полімерні композитні матеріали мають ряд переваг порівняно зі сталлю, але у конструкції насосної штанги мають суттєвий недолік – високу концентрацію напружень у місці їх з'єднання зі сталеву головою, що містить різьбу. Існує багато конструктивних рішень цієї проблеми, але забезпечення рівномірності з'єднання склопластикової чи вуглепластикової штанги із металевою головою надалі лишається досить складною задачею. Як свідчить практика, на колону насосних штанг у свердловині діють, окрім навантажень розтягу, навантаження від згину, крутного моменту, тертя до колони насосно-компресорних труб тощо. Тому слід провести порівняльний аналіз частин конструкцій насосних штанг: традиційної сталевій та комбінованої (металевого наконечника із композиційним стрижнем). В даній роботі до таких з'єднань прикладалися тільки навантаження згину, які особливо небезпечні при проходженні штангою викривлених ділянок свердловини та при ході штанг вниз. Встановлено, що під дією моменту згину максимальні нормальні напруження розподіляються по довжині насосної штанги нерівномірно і зосереджуються у переході між головою та стрижнем. Визначена величина максимальних нормальних напружень, що виникає у переході між сталевим наконечником і вуглепластиковим стрижнем, які з'єднанні без конструктивних особливостей (галтелей, різних переходів тощо) становить більше 1600 МПа. Такі величини напружень є небажаними при циклічній роботі з'єднання. Запропоновано для прикладу конструкцію металевої головки, яка дає змогу знизити напруження, що виникають при згині, і розподілити їх по з'єднанню рівномірніше порівняно навіть із традиційною насосною штангою.

Ключові слова: імітаційне моделювання, насосна штанга, сталева головка, вуглепластик, згин, напруження, поламка.

Для повышения эффективности использования штанговой насосной установки (ШСНУ) сегодня применяют колонны насосных штанг, изготовленные из стеклопластика и углепластика. Такие полимерные композитные материалы имеют ряд преимуществ по сравнению со сталью, но в конструкции насосной штанги имеют существенный недостаток – высокую концентрацию напряжений в месте их соединения со стальной головкой, содержащей резьбу. Существует много конструктивных решений этой проблемы, но обеспечение равнопрочности соединения стеклопластиковой или углепластиковой штанги с металлической головкой остается достаточно сложной задачей. Как свидетельствует практика, на колонну насосных штанг в скважине действуют, кроме нагрузок растяжения, нагрузки от изгиба, крутящего момента, трения с колонной насосно-компрессорных труб и т.д. Поэтому следует провести сравнительный анализ частей конструкций насосных штанг: традиционной стальной и комбинированной (металлического наконечника с композиционным стержнем). В данной работе к таким соединениям прикладывались только нагрузки изгиба, наиболее опасные при прохождении штангой искривленных участков скважины и при ходе штанг вниз. Установлено, что под воздействием момента изгиба максимально нормальные напряжения распределяются по длине насосной штанги неравномерно и сосредотачиваются в переходе между головкой и стержнем. Определенная величина максимальных нормальных напряжений, возникающая в переходе между стальным наконечником и углепластиковым стержнем, которые соединены без конструктивных особенностей (галтелей, различных переходов и т.п.) составляет более 1600 МПа. Такие величины напряжений нежелательны при циклической работе соединения. Предложена для примера конструкция металлической головки, позволяющая снизить возникающие при изгибе напряжения и распределить их по соединению равномернее по сравнению даже с традиционной насосной штангой.

Ключевые слова: имитационное моделирование, насосная штанга, стальная головка, углепластик, изгиб, напряжения, поломка.

*To increase the efficiency of the use of a sucker rod pumping unit (SRPU) today the columns of sucker rods of fiberglass and carbon fiber are used. Such polymer composites have a number of advantages over steel, but they have a significant drawback in the design of a sucker rod - a high concentration of stresses at the point where they*

are connected to a steel head containing a thread. Many constructive solutions to this problem have been developed, but maintaining the connection of a fiberglass or carbon-plastic barrel with a metal head remains quite a challenge. As practice shows, the bending of the pump rods in the well are also subjected to bending loads, torque, friction to the column of tubing (tubing) and the like. Therefore, a comparative analysis of the parts of the pump rod structures: traditional steel and combined (metal tip with composite rod) should be carried out. In this work, such joints were subjected only to bending loads, which are particularly dangerous when passing through a rod of bent sections of a well and when running down the bar. It is established that at the time of bending the maximum normal stresses are distributed along the length of the pump rod unevenly and are concentrated in the transition between the head and the rod. The maximum normal stresses occurring in the transition between the steel tip and the carbon-plastic core, which are jointed without structural features (galtels, different transitions, etc.), have been determined to be greater than 1600 MPa. Such value of stress is undesirable when cycling the connection in well. For example, the design of a metal head was proposed, which allows reducing the stresses arising from bending and distribute them on the connection more evenly, compared to the traditional sucker rod.

Keywords: simulation, sucker rod, steel head, CFRP, bending, stress, failure.

### **Вступ**

Більшість нафтових родовищ України експлуатуються у режимі постійного зниження дебіту та характерному підвищенні обводненості свердловин. У результаті цього знижується економічна ефективність вилучення продуктів пласта. Під час цього, обладнання, що застосовується, зазнає значних погіршень умов роботи. Сьогодні актуальними напрямками можна виділити комплекси заходів із зниження енергетичних затрат на підйом продукції та збільшення міжремонтного періоду використовуваного обладнання.

Вивчаючи статистику відмов вузлів штангової свердловинної насосної установки (ШСНУ), бачимо, що в середньому 20-30% відмов відбувається через обрив насосних штанг. У 70-80% випадків обрив колони штанг проходить по тілу штанги. Основними причинами є корозійне середовище та високі навантаження на штангову колону.

Для підвищення ефективності використання ШСНУ сьогодні застосовують колони насосних штанг, виготовлені склопластика та вуглепластика. Зрозуміло, що такі матеріали мають ряд переваг порівняно із сталлю. Проте для використання у конструкції насосної штанги склопластикову чи вуглепластикову штангу необхідно з'єднати із сталевим наконечником, що містить різьбу. Існує багато конструктивних вирішень такого з'єднання, але забезпечення рівномірності з'єднання склопластикової чи вуглепластикової штанги із металевим наконечником досі залишається важливою проблемою.

### **Аналіз вітчизняних досліджень і публікацій**

Насосні штанги призначені для передачі руху від наземного приводу (верстата-качалки) до свердловинного насоса. Використання склопластика, і вуглепластика як конструкцій-

ного матеріалу при виготовленні штанг дає більші техніко-економічні переваги порівняно із звичайними сталевими штангами завдяки високій міцності при порівняно низькій густині, корозійній стійкості та інших важливих фізико-механічних властивостях матеріалу. Проте, при всіх позитивних експлуатаційних властивостях склопластикових та вуглепластикових штанг залишається проблема надійного їх з'єднання із сталевими наконечниками.

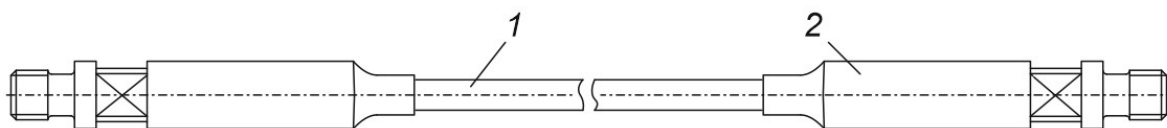
Конструкція склопластикової чи вуглепластикової насосної штанги містить зазвичай два елементи – стрижень та сталевий наконечник із різьбовою частиною для з'єднання із насосною муфтою (рис. 1).

Фізико-механічні властивості матеріалів насосних штанг подані у табл. 1.

### **Переваги застосування склопластикових та вуглепластикових штанг**

Описані вище фізичні відмінності склопластикових та вуглепластикових стрижнів від сталевих, визначають основні переваги і обмеження при застосуванні таких насосних штанг:

- зниження навантаження на головку балансира верстата-качалки при ході вгору штангової колони;
- можливість поглиблення підвіски штангового насоса до 2500 – 3000 м;
- зниження амплітудних та динамічних навантажень;
- відсутність впливу корозійного середовища;
- зниження впливу асфальтосмолистих та парафінових відкладень (АСПВ) на штангову колону;
- зменшення енергоємності наземного обладнання ШСНУ (більше 1 кВт/год на одну свердловину);
- збільшення терміну експлуатації в 5-6 разів.



1 – стрижень із склопластика чи вуглепластика; 2 – сталеві наконечники із різьбою (ніпелі)

**Рисунок 1 – Загальний вигляд насосної штанги**

**Таблиця 1 – Фізико-механічні властивості матеріалів, що застосовуються для виготовлення насосних штанг**

Найменування показника	Значення		
	Склопластик	Вуглепластик	Сталь
Густина, кг/м <sup>3</sup>	2000	1800	7850
Міцність на розрив, МПа	1600	2000	900
Модуль пружності, МПа	50 000	160 000	210 000
Теплопровідність, Вт/м×К	0,15	-	50
Коефіцієнт шорсткості, умовних одиниць	0,0015	-	0,03
Робоча температура, °С	до 130	до 130	до 300
Морозостійкість, °С	-60	-	-
Корозійна стійкість	Дуже висока	Дуже висока	Низька
Стійкість до кручення	Низька	Низька	Висока
Стійкість до стирання	Низька	Низька	Висока
Характер деформації	Пружна	Пружна	Пружна та пластична

### Недоліки клейового з'єднання вуглепластикової штанги із металевою головкою

Вуглепластиковий стрижень має гладку поверхню та приєднується до металевого наконечника (ніпелем) безпосередньо за допомогою клею. Міцність такого з'єднання визначається силами адгезії.

Відомо, що для отримання міцних та надійних клейових з'єднань слід виконати ряд обов'язкових вимог:

- з'єднувані поверхні повинні бути ретельно очищені, знежирені та мати визначену шорсткість;

- повинні бути дотримані певні умови зберігання матеріалів із підготовленими до склеювання поверхнями із моменту закінчення підготовки до моменту склеювання.

Недотримання вказаних вимог різко знижує міцність та надійність отримуваних з'єднань і, як наслідок, міцність і надійність всієї конструкції насосної штанги при її експлуатації.

Розглянемо конструкції запропонованих варіантів з'єднань склопластикових та вуглепластикових стрижнів із металевими наконечниками.

**З'єднання штанги з металевою головкою [1].** Циліндричний стрижень із композиційного матеріалу з'єднується із металевим наконечником,

що містить з однієї сторони різьбу, а, з іншої, – установочну частину із внутрішньою порожниною. Ця порожнина має донну конічну зону і вхідний отвір. Адгезив заповнює простір між внутрішньою порожниною установочної частини ніпеля і поверхнею стрижня. Слід зауважити, що зовнішня поверхня стрижня, яка розміщена у зоні внутрішньої порожнини установочної частини ніпеля, має змінний профіль. Його висота збільшується у напрямку від вхідного отвору ніпеля до дна. Це забезпечує вирівнювання навантаження між витками змінного профілю, підвищуючи динамічну міцність з'єднання стрижня і ніпеля.

При цьому:

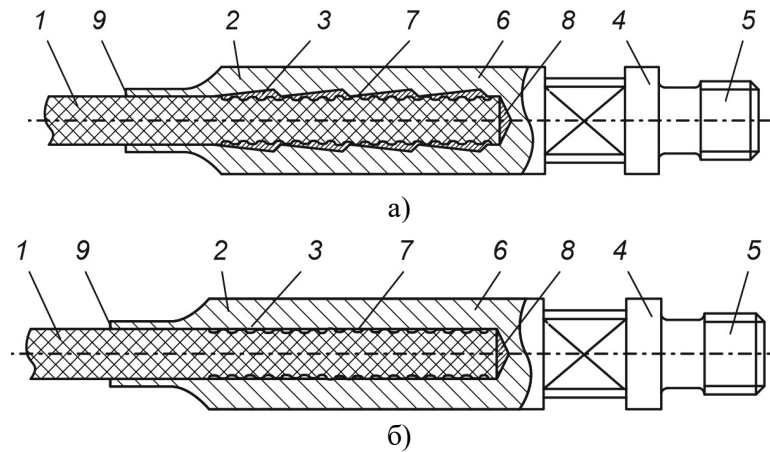
- змінний профіль може бути виконаний у виді гвинта;

- змінний профіль може бути виконаний у вигляді кільцевих радіальних канавок;

- внутрішня порожнина установочної частини ніпеля може бути виконана у вигляді циліндра;

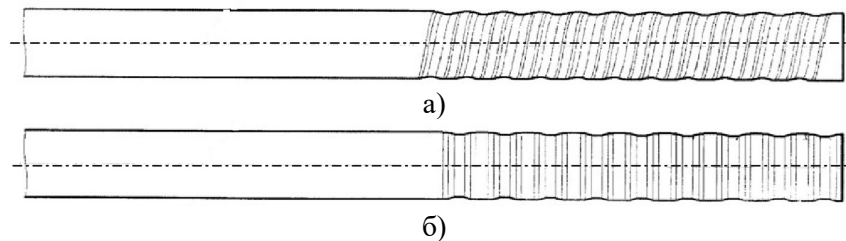
- внутрішня порожнина установочної частини ніпеля може бути виконана у вигляді послідовних циліндричних і конічних зон, що чергуються;

- композиційним матеріалом може бути склопластик, вуглепластик або базальтопластик.



*а* – внутрішня порожнина ніпеля, виконана у вигляді циліндричних та конічних зон, що чергуються;  
*б* – внутрішня порожнина ніпеля виконана у вигляді циліндру; 1 – стрижень із високоміцного композиційного матеріалу; 2 – ніпель; 3 – адгезив; 4 – з'єднувальна частина ніпеля; 5 – різьбовий елемент; 6 – установочна частина ніпеля; 7 – внутрішня порожнина; 8 – донна конічна зона; 9 – вхідний отвір

**Рисунок 2 – Вузол кріплення стрижня до ніпеля**



*а* – у вигляді гвинта; *б* – у вигляді кільцевих радіальних канавок

**Рисунок 3 – Стрижні з високоміцного композиційного матеріалу із змінним профілем**

Окрім того, для такого з'єднання характерні найбільш низькі вимоги до стану з'єднаних поверхонь, а також виключається їх додаткова підготовка, яка є характерною для клейових з'єднань. Це не тільки зменшує вплив клеєвого з'єднання на міцність та надійність штанги загалом під час експлуатації, але і дозволяє суттєво спростити операцію кріплення стрижня та ніпеля.

Величини профільного кута та кроку змінного профілю розраховуються для кожної конструкції штанги окремо і залежать від механічних характеристик стрижня із високоміцного композиційного матеріалу та адгезиву.

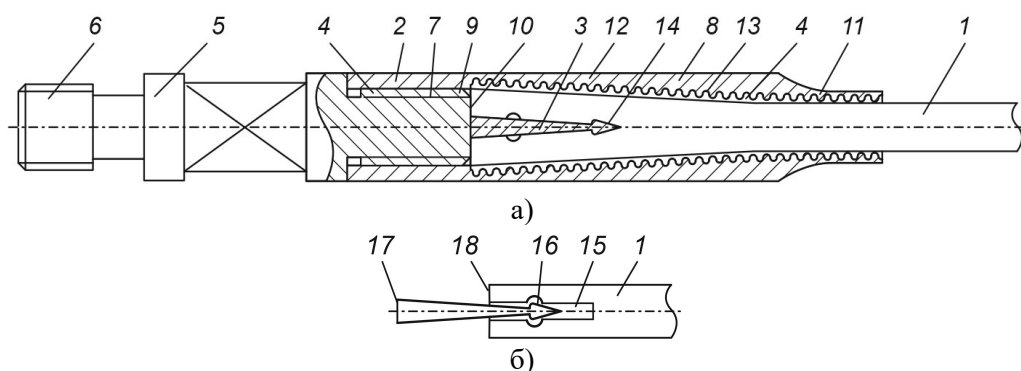
Стінки внутрішньої порожнини установочної частини ніпеля можуть бути виконані або у вигляді циліндра, або у вигляді циліндричних та конічних зон, що чергуються. Внутрішній діаметр установочної частини ніпеля більший від зовнішнього діаметра стрижня. Простір, що при цьому утворюється, заповнюється адгезивом.

На рис. 2 зображено у розрізі вузол кріплення стрижня до ніпеля.

На рис. 3 подано зображення стрижня із високоміцного композиційного матеріалу із змінним профілем.

З допомогою різьбового елемента 5, що виконаний на з'єднувальній частині 4 ніпеля 2, штанги з допомогою муфт з'єднуються у колоду, яка є складовим елементом штангової глибинно-насосної установки. Кріплення стрижня 1 із високоміцного композиційного матеріалу в установочній частині 6 ніпеля проводиться шляхом розміщення адгезиву 3 між зовнішньою поверхнею стрижня 1 та внутрішньою порожниною 7 установочної частини ніпеля. При цьому фіксування стрижня в установочній частині ніпеля досягається безпосередньо за рахунок клейомеханічного з'єднання, тобто як за рахунок сил адгезії, так і за рахунок механічних сил та наявності на стрижні змінного профілю.

У патенті [2] розглядається конструкція вузла кріплення склопластикового стрижня у металевих наконечниках та пропонується спрощена технологія виготовлення та складання цієї конструкції.



*а – вузол у зібраному вигляді; б – елементи перед збиранням вузла*

1 – склопластиковий стрижень; 2 – наконечник; 3 – розклинююча деталь; 4 – адгезив;  
 5 – з'єднувальна частина; 6, 7 – різьбові елементи; 8 – установча частина; 9 – різьбовий елемент;  
 10 – допоміжна порожнина; 11 – циліндрична вхідна зона; 12 – конічна кільцева зона; 13 – різьба;  
 14 – стрілоподібна вершина; 15 – наскрізні прорізи; 16 – отвір; 17 – основа; 18 – торець стрижня

**Рисунок 4 – Вузол кріплення склопластикового стрижня у наконечнику**

На рисунку 4 зображено у розрізі вузол кріплення склопластикового стрижня 1 у наконечнику 2 із розклинюючою деталлю 3 та адгезивом 4.

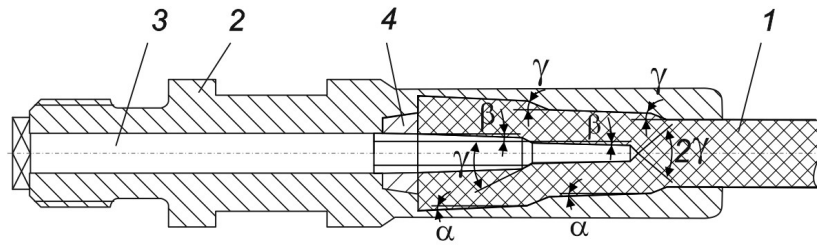
Наконечник 2 має з'єднувальну частину 5 із різьбовими елементами 6 і 7 та установочну частину 8 із різьбовим елементом 9 та допоміжною порожниною 10, із однієї сторони, та циліндричною вхідною зоною 11 і конічною кільцевою зоною 12 для розміщення стрижня 1, із іншої сторони. Поверхня циліндричної вхідної зони 11 і конічної кільцевої зони 12 виконані із різьбою 13. Розклинююча деталь 3 виконана у вигляді пластини, яка у поперечному перерізі є конусом із стрілоподібною вершиною 14. Слід зауважити, що висота розклинюючої деталі 3 складає 2/3 висоти конічної кільцевої зони 12 наконечника 2, а її конусність у 1,15-1,3 рази перевищує конусність останньої. На обох кінцях склопластикового стрижня 1 строго по центру відносно його поздовжньої осі виконані наскрізні прорізи 15 довжиною, що складає 0,8-1,0 висоти розклинюючої деталі 3 і поперечними отворами 16 для встановлення у них потовщеної частини стрілоподібною вершини 14 розклинюючої деталі 3, як наведено на рисунку 5.

Кріплення склопластикового стрижня 1 у наконечниках 2 відбувається наступним чином. Попередньо підготовлений із вставленою у проріз 15 розклинюючою деталлю 3 кінець склопластикового стрижня 1 вводиться через циліндричну вхідну зону 11 у конічну кільцеву зону 12 попередньо нагрітої і змащеної адгезивом 4 установочної частини 8 до упору різьбовий елемент 9. Через допоміжну порожнину 10 із сторони різьбового елемента 9 склопластиковий стрижень 1 розклинюється з допомогою

деталі 3 до тих пір, доки її основа 17 не зрівняється із торцем 18 склопластикового стрижня 1. Потім через допоміжну порожнину 10 внутрішня порожнина установочної частини 8 заливається адгезивом 4 спеціального складу до появи його через зазор між стрижнем 1 та циліндричною вхідною зоною 11. Різьбовий елемент 7 з'єднувальної частини 5 наконечника 2 загвинчується на різьбовий елемент 9 установочної частини 8 до упору. Далі вузол просушується при визначених температурному та часовому режимі.

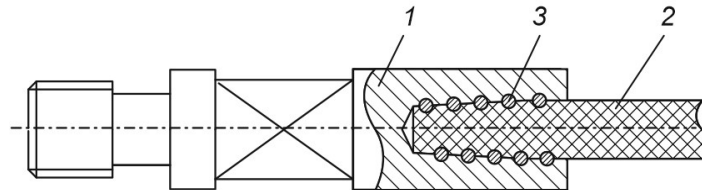
Відома також конструкція роз'ємного з'єднання головки насосної штанги з склопластиковим тілом [3], що має можливість заміни та спрацьовані деталі на нові. З'єднання здійснюється розтисканням конічним кінцем гвинта, який вгвинчений в гайку, запресовану в корпусі головки, попередньо позбавлених зв'язуючого і просочених клеєм волокон композиційного тіла в напрямку конусних виточок в отворі наконечника. Форма отвору наконечника і поверхні гвинта утворена кількома конусами, де перша і третя конусна поверхні виготовляються з кутом у  $\gamma=17^\circ$ , а друга і четверта – з кутами  $\alpha$  і  $\beta$ , рівними близько  $2-3^\circ$ . Для збільшення ефективності затискання волокон стрижня пропонується кути конусних розточок отвору робити на кілька градусів більшими за кути конусних поверхонь гвинта ( $\beta=\alpha-1^\circ$ ).

Використання гвинта, який розтискає волокна склопластикового стрижня, дозволяє значно ефективніше використовувати міцнісні властивості склопластику, оскільки у з'єднанні будуть приймати участь не тільки поверхневі волокна стрижня, а й внутрішні. Крім цього, застосування гайки, яка направляє в отвір



1 – склопластикове тіло; 2 – сталевий наконечник; 3 – гвинт; 4 – гайка

Рисунок 5 – З'єднання головки насосної штанги з склопластиковим тілом



1 – сталевий наконечник; 2 – тіло насосної штанги; 3 – сталева пружина

Рисунок 6 – З'єднання сталевго наконечника з полімерно-композиційним тілом насосної штанги

за допомогою конуса і запресовується в ньому, дозволяє не використовувати різьбу в корпусі головки, що могло б призвести до зародженням в ній втомних тріщин.

На рисунку 5 зображено з'єднання наконечника насосної штанги і склопластикового тіла. З'єднання складається з склопластикового тіла 1, сталевго наконечника насосної штанги 2 і гвинта 3, на яких виконані конічні поверхні з кутами  $\alpha$ ,  $\gamma$ ,  $\beta$ , та гайки 4. З'єднання виконується наступним чином. Склопластикове тіло штанги 1 позбавляється зв'язуючого на певну довжину і, просочене клеєм, вставляється в отвір сталевго наконечника 2, поверхня якого утворена кількома конусами з невеликими кутами. В протилежний кінець головки, в якому просвердлено отвір невеликого діаметру, вставляється гвинт 3, кінець якого утворюють кілька конусних поверхонь з малими кутами. Гвинт закручується до упору в гайку 4 і конусними поверхнями розтискає волокна склопластикового стрижня.

Після застигання клею утворюється міцне з'єднання, яке за необхідності можна роз'єднати, відгвинтивши гвинт і витягнувши попередньо нагрітій кінець склопластикового стрижня.

Відоме також з'єднання (рис. 6) сталевго головки з полімерно-композиційним тілом насосної штанги [4]. Його особливістю є такий спосіб з'єднання сталевго наконечника з полімерно-композиційним тілом насосної штанги, який полягає у зменшенні внутрішніх напружень, збільшенні площі зрізу, що досягається за рахунок нарізання несиметричної різьбової по-

верхні круглого профілю в сталевому наконечнику і на полімерно-композиційному тілі насосної штанги. У профільний зазор, який утвориться при їх з'єднанні, встановлюється сталева пружина, що і служить з'єднуючим елементом між сталевим наконечником і полімерно-композиційним тілом насосної штанги.

Різьбова поверхня на тілі штанги утворюється накатуванням, завдяки чому не порушується шарова структура матеріалу, оскільки волокна матеріалу не розрізаються, а деформуються пластично під дією різьбонакатних плашок чи роликів. Отримана таким методом різьба має рівну, чисту і зміцнену поверхню. Використання круглого несиметричного профілю різьбової поверхні призводить до зменшення концентрації напружень в з'єднанні, збільшенні площі зрізу, а отже підвищує границю міцності з'єднання. Крім цього, з метою забезпечення герметичності, високої міцності з'єднання сталевго наконечника і тіла штанги на її кінці та всередині сталевго наконечника виконується конічна поверхня  $Z < 1:16$ .

#### Аналіз умов роботи колони насосних штанг ШСНУ

Аналіз промислових матеріалів свідчить, що поломки сталевих штанг відбуваються як в муфтових різьбових з'єднаннях, так по їх тілу [6-9]. Поломки різьбових з'єднань складають до 30 % від загальної кількості поломок штанг, а 80 % цієї кількості пов'язані з втомою металу [6, 7]. Основною причиною поломок штанг є їх циклічне навантаження та виникнення напру-

жень, що за відповідних умов можуть зрости і перевищити границю міцності матеріалу штанг (наприклад, при заклинюванні плунжера насоса).

На довговічність штанг значний вплив має їх поверхнева цілісність. Основну увагу під час виготовлення штанг надають шорсткості їх поверхні. Поверхневі залишкові напруження з'являються під час експлуатації штанг. Недотримання технічних вимог транспортування та умов зберігання призводять до згинання штанг, а подальше їх випрямлення перед спусканням у свердловину приводить до утворення на їх поверхні мікротріщин, які є концентраторами напружень. Крім цього, необережне поводження зі штангами під час роботи сприяє утворенню на поверхні подряпин і заглиблень, які також є концентраторами напружень [6-9].

Під дією змінного циклічного навантаження відбуваються втомні руйнування колони. До них відносять поломки тіла муфт, різьби та зарізьбової канавки ніпеля [6-10].

Під час роботи в свердловині штанги та муфти зношуються внаслідок їх тертя до колони насосно-компресорних труб. Згин штанг може виникати у випадку заклинювання плунжера насоса під час руху вниз, від ударів плунжера до рідини (через неповне заповнення циліндра), у викривлених свердловинах, а також у разі використання штанг малого діаметра в насосно-компресорних трубах великого діаметра.

Під час роботи колони штанг в корозійному середовищі муфта може зламатись в будь-якому місці.

Після ударів по муфтах, що часто спостерігаються під час розгвинчування різьбових з'єднань, а також виникають концентрації напружень. Крім того, удари можуть призвести до деформації контактуючих площин, що зумовлює доступ рідини до різьби, навіть у тому випадку, коли воно з'єднання згвинчене із оптимальним моментом [6-9]. Втомні поломки тіла муфти, які зумовлені високою концентрацією напружень в останній робочій впадині різьби муфти через зношену її зовнішню поверхню. Поломки ніпеля насосної штанги зумовлені високою концентрацією напружень у перших витках різьби і зарізьбовій канавці.

Під час опускання в свердловину з просторовим викривленням стовбура і при роботі насосної установки в колоні штанг виникають напруження розтягу, згину та напруження від дії крутих моментів, які можуть призвести до самовідгвинчування різьбових з'єднань [8].

Іншим чинником поломок різьбових з'єднань є прикладання до них неконтрольованого моменту згвинчування [6, 7], що може

призвести як до самовідгвинчування, так і до руйнування або зменшення навантажень, які сприймаються з'єднанням.

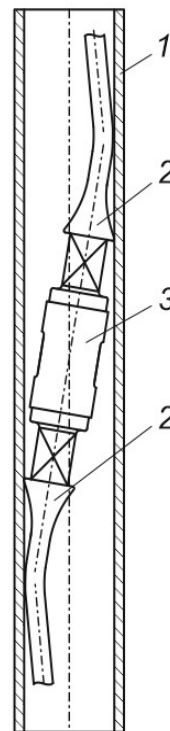
### **Мета роботи та обґрунтування необхідності її виконання**

З проведеного аналізу конструктивних вирішень, що стосується з'єднання склопластикового тіла насосної штанги із металевим наконечником, зрозуміло, що всі вони розраховані на сприйняття з'єднанням тільки осьового навантаження. Проте, як свідчить практика, на колону насосних штанг у свердловині діють також навантаження від згину, крутного моменту, тертя до колони насосно-компресорних труб (НКТ) тощо.

Тому метою роботи є проведення порівняльного аналізу частин конструкцій насосних штанг: традиційної сталеві та комбінованої (металевого наконечника із композиційним стрижнем) при дії на них тільки навантажень згину.

### **Викладення основного матеріалу**

Форма, якої набуває колона штанг у стані поздовжнього згину визначається жорсткістю самих штанг і муфтових різьбових з'єднань. Характерний вигляд зігнутої насосної штанги наведено на рисунку 7, з якого видно, що штанга



1 – насосно-компресорна труба;  
2 – насосна штанга; 3 – муфта

**Рисунок 7 – Згин та деформація насосної штанги в НКТ**

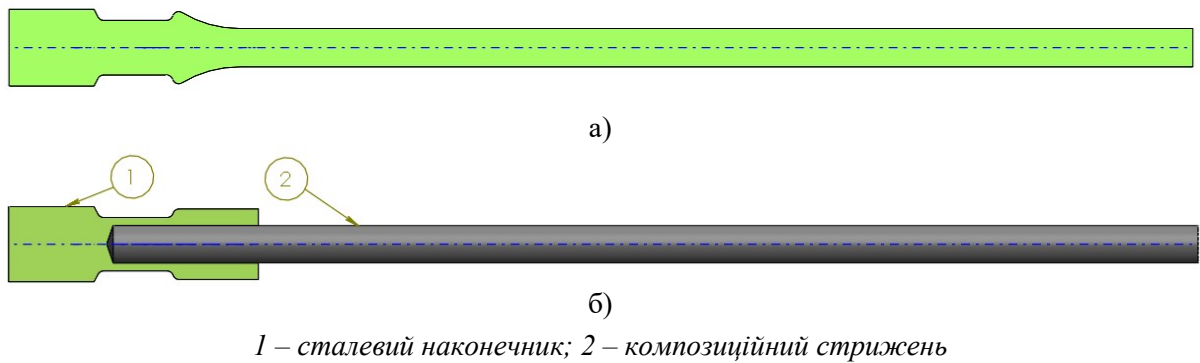


Рисунок 8 – Фрагменти для дослідження напружено-деформованого стану традиційної (а) та композиційної (б) насосних штанг



Рисунок 9 – Граничні умови

при ході вниз згинається в місцях зміни жорсткості. Руйнування (обриви) штанг як правило відбуваються на відстані 100 - 250 мм від їх головок. При аналізі поверхонь зламів виявлено, що вони містять прокородовані зони з розвинутими вглиб тіла штанги втомними тріщинами. Глибина і площа цієї зони тим більші, чим менша величина приведенного напруження виникала в тілі штанги при її роботі в свердловині.

Далі розглянемо алгоритм запропонованих досліджень, отримані результати та пропозиції.

Отже, для дослідження напружено-деформованого стану насосних штанг (традиційних та композиційних) розроблено їхні фрагменти, наведені на рисунку 8.

Діаметр тіла штанги рівний 19 мм, довжина моделі – 600 мм. У конструкції, зображеної на рисунку 9, б приєднання сталевий наконечника 1 до композиційного стрижня 2 під час імітаційного дослідження відбувається з допомогою інструменту програми Ansys Workbench “Bonded”.

Граничні умови, прикладені до всіх досліджуваних конструкцій є однаковими (рис. 9). Довжини моделей також однакові. Величина зміщення торця стрижня обрана рівною 40 мм. Торець половини муфти зафіксовано.

Матеріалами досліджуваних конструкцій прийнято:

- металевий наконечник – сталь (табл. 1);
- композиційний матеріал – вуглепластик (табл. 2).

Таблиця 2 – Фізико-механічні властивості вуглепластика, вибрані для моделювання

Модуль пружності у напрямі X	3,95e+05	МПа
Модуль пружності у напрямі Y	6000,0	МПа
Модуль пружності у напрямі Z	6000,0	МПа
Коефіцієнт Пуассона у напрямі XY	0,20000	
Коефіцієнт Пуассона у напрямі YZ	0,40000	
Коефіцієнт Пуассона у напрямі XZ	0,20000	
Модуль зсувів у напрямі XY	8000,0	МПа
Модуль зсувів у напрямі YZ	2142,9	МПа
Модуль зсувів у напрямі XZ	8000,0	МПа

Для виведення графічних залежностей на досліджуваних конструкціях побудовано спеціальні лінії, розміщені на їх поверхнях строго вздовж поперечного перерізу (рис. 10).

На рисунку 11 наведено розподіл нормальних напружень (по осі X) на поверхні досліджуваної моделі, а на рисунку 12 – розподіл нормальних напружень у моделі вздовж ліній 1-2 та графічні залежності.





Рисунок 10 – Лінія для виведення результатів та побудови графічних залежностей

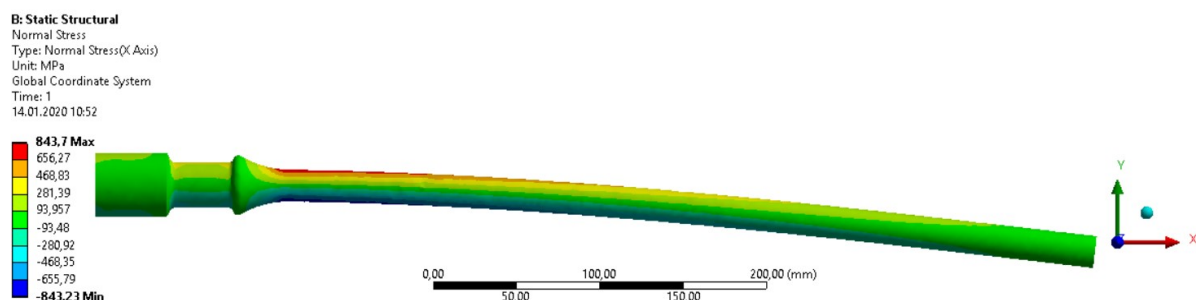


Рисунок 11 – Розподіл нормальних напружень (по осі X) на поверхні досліджуваної моделі (традиційної сталеві насосної штанги)

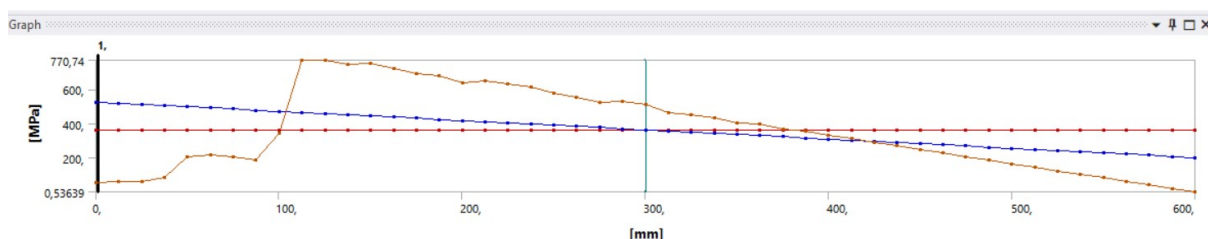
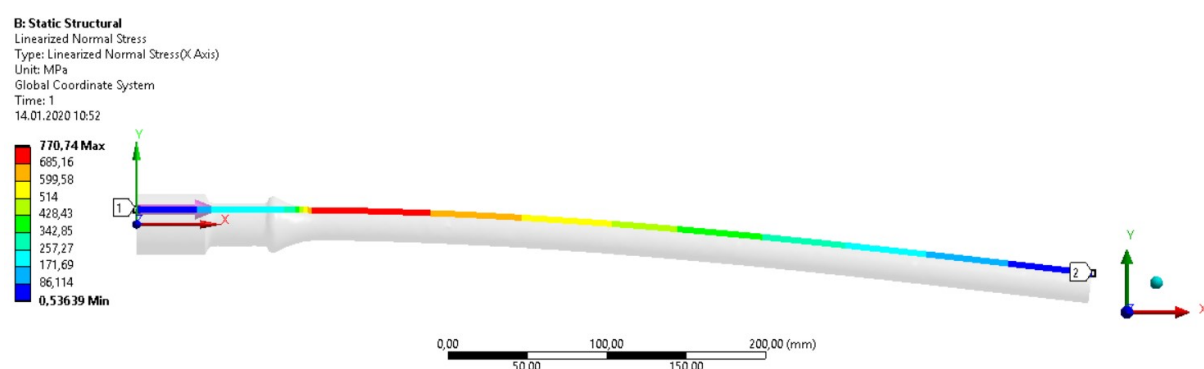


Рисунок 12 – Розподіл нормальних напружень (по осі X) вздовж лінії 1-2 та графічні залежності (для традиційної сталеві насосної штанги)

На рисунку 13 наведено розподіл нормальних напружень (по осі X) у моделі (металевий наконечник із композиційним стрижнем) вздовж лінії 1-2 та графічні залежності.

Із порівняння графічних залежностей (рис. 12 та 13) випливає, що на переході від металевого наконечника до композиційного стрижня виникають значні величини напружень (1636 МПа), що є вкрай небажаним, оскільки при роботі у свердловині таке з'єднання піддається ще навантаженням від розтягуючого зусилля та крутного моменту. Якщо врахувати циклічність дії прикладених до з'єднання навантажень, то термін його експлуатації буде незначним.

З метою підвищення терміну експлуатації таких з'єднань можна запропонувати, напри-

клад, виконання сталевго наконечника, що містить додатні чотири пелюстки (рис. 14). Вони під час роботи з'єднання при навантаженнях згину будуть підтримувати вуглепластиковий стрижень та працювати як пружини. Цей варіант виконання є найпростішим та, зрозуміло може бути вдосконаленим. Наприклад, для запобігання зношування можна між стрижнем та наконечником використовувати підкладку, для підвищення жорсткості можна змінювати форму та кількість пелюсток, на поверхню пелюсток можна встановлювати додаткові кільця (щоб при згині працювали всі пелюстки одночасно).

При дослідженні цієї конструкції (рис. 15) враховано контакт між сталевим наконечником та вуглепластиковим стрижнем – без тертя.

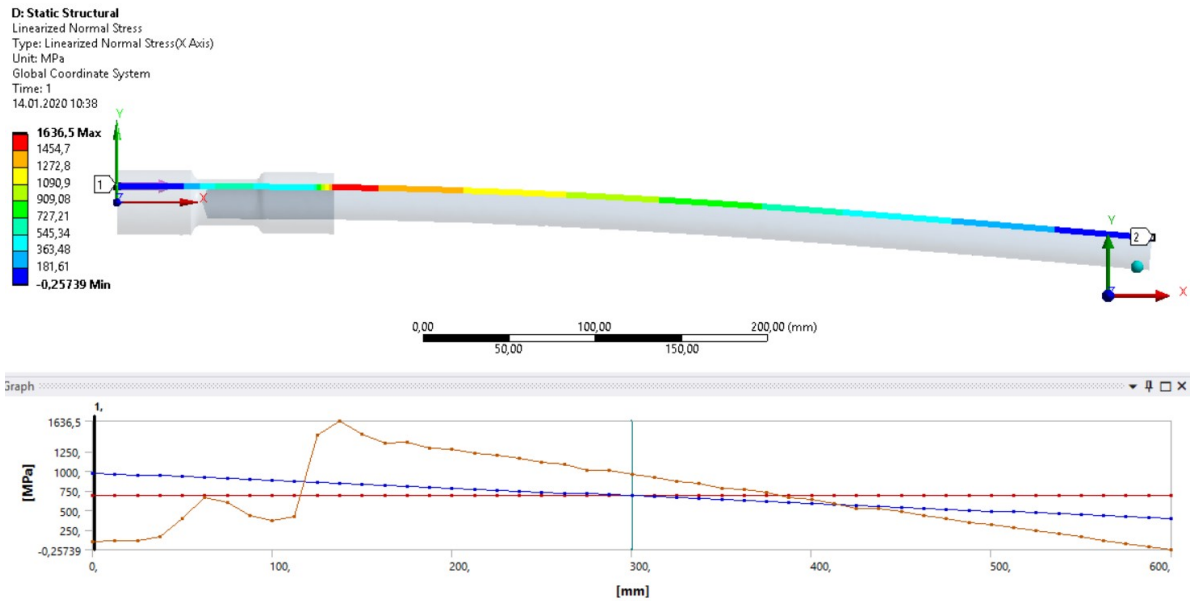
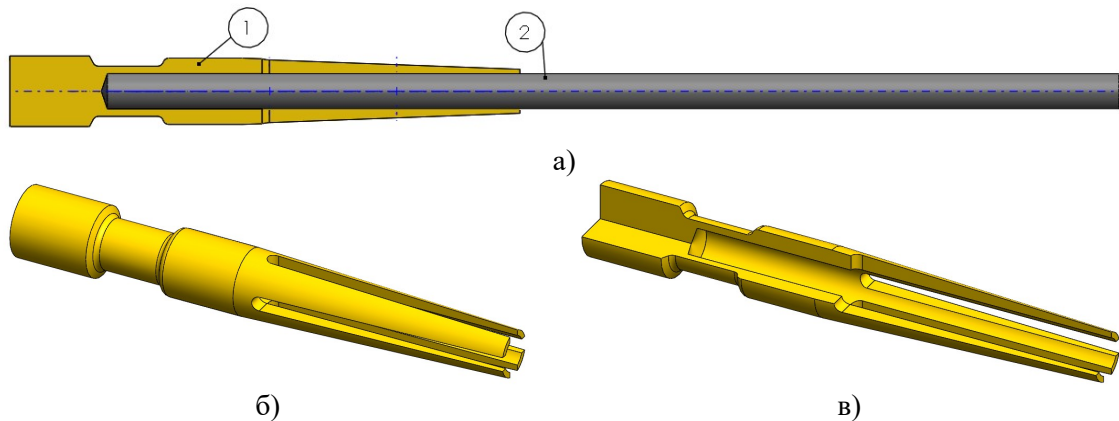


Рисунок 13 – Розподіл нормальних напружень (вздовж осі X) у моделі (металевий наконечник із композиційним стрижнем) вздовж лінії 1-2 та графічні залежності



а – з'єднання вуглепластикового стрижня із запропонованою конструкцією сталевго наконечника; б – сталевий наконечник; в – сталевий наконечник з четвєртинним вирізом

Рисунок 14 – Насосна штанга із запропонованою конструкцією сталевго наконечника

На рис. 15 подані результати імітаційного моделювання запропонованої конструкції з'єднання.

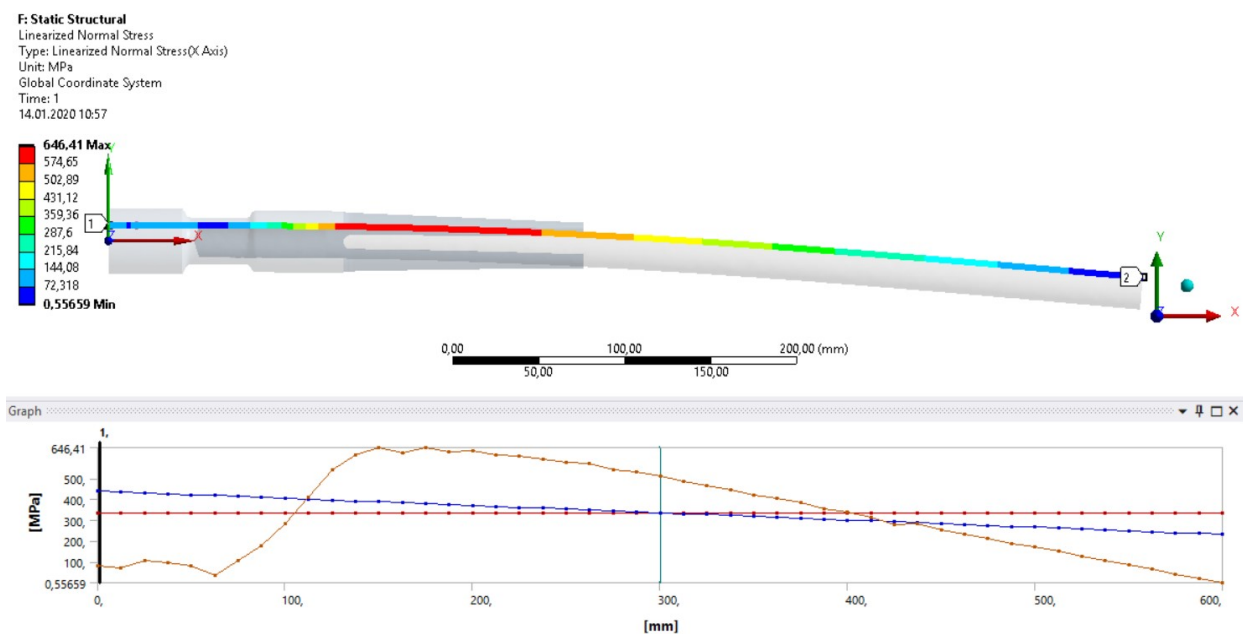
Отже, згідно отриманих результатів імітаційного моделювання (рис. 16) у запропонованій конструкції з'єднання сталевго наконечника із вуглепластиковим стрижнем, величина нормальних напружень є у 2,5 рази меншою порівняно із комбінованою (металевий наконечник із композиційним стрижнем), і у 1,2 рази порівняно із традиційною сталевгою насосною штангою.

### Висновки

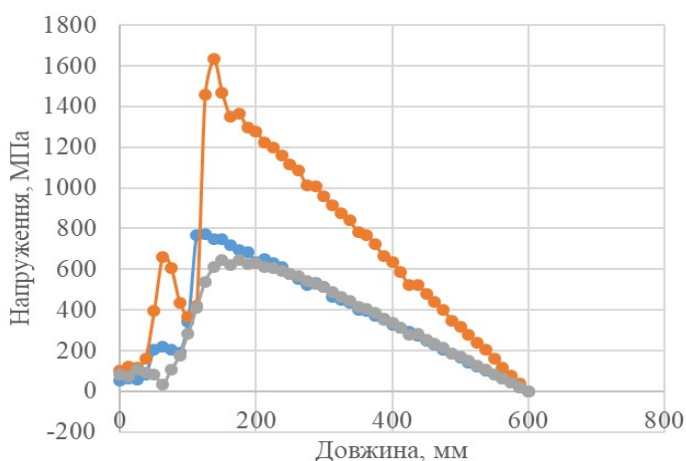
Попри наявність великої кількості конструкцій з'єднань склопластикового чи вуглепластикового тіла штанги із металевим наконечником, у статті запропоновано нову. Її особ-

ливністю є наявні чотири сталеві пелюстки, які призначені для зменшення навантажень згину у місці з'єднання тіла штанги та наконечника. Для дослідження напружено-деформованого стану традиційної, комбінованої та запропонованої конструкцій насосних штанг застосовано імітаційне моделювання із застосуванням методу кінцевих елементів. В результаті дослідження було отримано значення та розподіл нормальних напружень. Встановлено, що у запропонованій конструкції з'єднання сталевго наконечника із вуглепластиковим стрижнем величина нормальних напружень у 2,5 рази менша порівняно із комбінованою і у 1,2 рази порівняно із традиційною сталевгою насосною штангою.

Пропоновану конструкцію з'єднання сталевго наконечника із вуглепластиковим стрижнем можна в подальшому вдосконалити (з



**Рисунок 15 – Розподіл нормальних напружень (по осі X) у моделі (запропонована конструкція сталевго наконечника із вуглепластиковим стрижнем) вздовж лінії 1-2 та графічні залежності**



— традиційна металева;  
 — комбінована (металевий наконечник із композиційним стрижнем);  
 — запропонована конструкція з'єднання сталевго наконечника із вуглепластиковим стрижнем

**Рисунок 16 – Розподіл нормальних напружень вздовж лінії 1-2 для досліджуваних конструкцій насосних штанг**

метою запобігання зносу стрижня від впливу пелюсток, за необхідності підвищити жорсткість пелюсток тощо).

Застосування на практиці розробленої конструкції склопластикової чи вуглепластикової конструкції насосної штанги (з'єднання тіла із металевим наконечником) дасть змогу підвищити термін експлуатації колони насосних штанг, зменшивши при цьому енергоємності наземного обладнання ШСНУ.

### Література

1. Пат. 2378484 РФ, МПК E21B17/04. Насосная штанга / Волков Ю. П., Поздеев С. П., Куклина С. В.; заявл. 15.08.2008; опуб. 10.01.2010.
2. Пат. 2169250 РФ, МПК E21B17/00. Насосная стеклопластиковая штанга / Николаев А.В., Гильманова А.М., Гимазетдинов Р.А., Кондратюк И.И. – № 2000 11799/03; заявл. 11.05.2000; опубл. 20.06.2001.

3. Пат. 50093 Україна, МПК E21B17/02. З'єднання головки насосної штанги з склопластиковим тілом / Копей В.Б., Стеліга І.І., Копей Б.В., Петрина Ю.Д.; № 2001 075460; заявл. 31.07.2001; опубл. 15.10.2002. Бюл. №10. 2 с.
4. Пат. 50094 Україна, МПК E21B17/02. З'єднання сталльної головки з полімерно-композиційним тілом насосної штанги / Крижанівський Є.І., Копей Б.В., Стеліга І.І., Копей В.Б.; № 2001 075462; заявл. 31.07.2001; опубл. 15.10.2002. Бюл. №10. 2 с.
5. <http://www.alrdc.com/workshops/papers/VectorRod™: Carbon Fiber Sucker Rod. Hugh Q. Cook, Jr., Partner and CTO, VectorSum, Inc. 10 p.>
6. Фаерман И. Л. Штанги для глубинных насосов. Баку: Азнефтеиздат, 1955. 323 с.
7. Круман Б.Б. Глубинно-насосные штанги. М.: Недра, 1977. 181с.
8. Ишмурзин А.А. Хоанг Тхинь Няп. Методика расчета крутящих моментов в трубах и штангах, возникающих при спуске в скважину с пространственным искривлением ствола. Нефтегазовое дело. 2006. №2. С. 28-33.
9. Гейнрих Ришмюллер. Хорст Майер. Добыча нефти глубинными штанговыми насосами М.: Фест-Альпине, 1988. 151 с.
10. Науково-технологічні принципи комплексного підвищення ресурсу свердловинного нафтогазового обладнання: дис. докт. техн. наук / Копей Богдан Володимирович. Івано-Франківськ, 1996. 478 с.
- Kopei V.B.; patentovlasnyk IFNTUNH. No 2001 075462; zaiavl. 31.07.2001; opubl. 15.10.2002. Biul. No 10. 2 p. [in Ukrainian]
5. <http://www.alrdc.com/workshops/papers/VectorRod™: Carbon Fiber Sucker Rod. Hugh Q. Cook, Jr., Partner and CTO, VectorSum, Inc. 10 p.>
6. Faerman I. L. Shtangi dlya glubinyh nasosov. Baku: Aznefteizdat, 1955. 323 p. [in Russian]
7. Kruman B.B. Glubinno-nasosnyie shtangi. M.: Nedra, 1977. 181 p. [in Russian]
8. Ishmurzin A.A., Hoang Thin Nyan Metodika rascheta krutyaschih momentov v trubah i shtangah, vznikayuschih pri spuske v skvazhinu s prostranstvennyim iskrivleniem stvola. *Neftegazovoe delo*, 2006. No 2. P. 28-33. [in Russian]
9. Geynrh Rishmyuller, Horst Mayer. Dobyicha nefi glubinyimi shtangovyimi nasosami. M.: Fest-Alpine, 1988. 151 p. [in Russian]
10. Kopei B.V. Naukovo-tekhnologichni pryntsy py kompleksnoho pidvyshchennia resursu sverdlovyynnoho naftohazovoho obladdannia: dys... dokt. tekhn. nauk: / Kopei Bohdan Volodymyrovych. Ivano-Frankivsk, 1996. 478 p. [in Ukrainian]

### References

1. Pat. 2378484 RF, МПК E21B17/04. Nasosnaya shtanga / Volkov Yu. P., Pozdeev S. P., Kuklina S. V.; zayavl. 15.08.2008; opub. 10.01.2010. [in Russian]
2. Pat. 2169250 RF, МПК E21V17/00. Nasosnaya stekloplastikovaya shtanga / Nikolaev A.V., Gilmanova A.M., Gimazetdinov R.A., Kondratyuk I.I.; patentovlasnik OAO «Opyitno-eksperimentalnyiy zavod geofizicheskoy apparatury «ALBTERNATIVA»». No 2000 11799/03; zayavl. 11.05.2000; opubl. 20.06.2001. [in Russian]
3. Pat. 50093 Ukraina, МПК E21V17/02. Z'iednannia holovky nasosnoi shtanhy z skloplastykovym tilom / Kopei V.B., Steliha I.I., Kopei B.V., Petryna Yu.D.; patentovlasnyk IFNTUNH. No 2001 075460; zaiavl. 31.07.2001; opubl. 15.10.2002. Biul. No 10. 2 p. [in Ukrainian]
4. Pat. 50094 Ukraina, МПК E21V17/02. Z'iednannia stalnoi holovky z polimerno-kompozytsiinym tilom nasosnoi shtanhy / Kryzhanivskyi Ye.I., Kopei B.V., Steliha I.I.,