
Матеріали, конструкції та обладнання об'єктів нафтогазового комплексу

УДК 622.24.053.6

DOI: 10.31471/1993-9868-2023-1(39)-42-49

МОДЕРНІЗАЦІЯ ЛАБОРАТОРНОГО СТЕНДУ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ МОДЕЛІ ДІЛЯНКИ БУРИЛЬНОЇ КОЛОНИ

Р. В. Рачкевич¹, І. І. Чудик¹, В. Р. Харун¹, І. О. Рачкевич^{2*}

¹ІФНТУНГ; 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15;
e-mail: ruslan.rachkevych@nimg.edu.ua

²Івано-Франківський медичний університет; 76018, м. Івано-Франківськ, вул. Галицька, 2,
e-mail: irachkevych@ifntu.edu.ua

Оцінка напружено-деформованого стану бурильних колон під час їх експлуатації у свердловинах із довільною зміною зенітного та азимутального кутів, інтервалах із порушеннями цілісності стінок необсадженого стовбура та різкими перегинами осі є надзвичайно важливою науково-практичною проблемою. Одним із методів її розв'язання є фізичне моделювання системи «бурильна колона – стовбур свердловини». На основі критичного огляду наукових праць за зазначеною вище проблематикою сформульовано мету даної статті – провести модернізацію існуючої конструкції лабораторного стенду для дослідження напружено-деформованого стану моделей бурильних колон у свердловинах із довільно викривленою віссю під дією сили розтягу або стиску та впливу крутного моменту. Зокрема, було змінено опорний вузол на виготовлений у вигляді жорсткої ферми з металевих кутових профілів. В результаті досягнуто обмеження будь-яких переміщень одного з кінців моделі бурильної колони. Навантажувальний вузол дообладнано додатковими роликками, що дало можливість прикладати до протилежного кінця моделі бурильної колони як осьову силу розтягу, так і силу стиску. З метою непрямого вимірювання нормальних напружень в поперечному перерізі моделі бурильної колони використано метод тензометрування. Статистичний аналіз результатів вимірювання проводився за критерієм Діксона, що використовується для малих вибірок експериментальних даних. Це дало можливість виокремити некоректні величини вимірюваних напруг на тензорезисторах та не враховувати їх для розрахунку нормальних напружень у поперечному перерізі як моделі, так і натурної бурильної колони. Зазначено, що подальші вдосконалення конструкції експериментального стенду полягатимуть в обладнанні його електродвигуном для можливості обертання моделі бурильної колони та проведення досліджень у динамічній постановці.

Ключові слова: модель бурильної колони; лабораторний стенд; напружено-деформований стан.

Evaluation of drill strings stress-strain state during their operation in the wells with random change of zenith and azimuth angles, non casing sections of well walls and dog-legs is very important scientific and practical problem. One of the methods of its solution is the physical modeling of the "drill string – wellbore" system. On the basis of scientific works analysis in mentioned above field, aim of this article is formulated as modernization of the laboratory test bench existing construction with the aim of explore stress-strain state of the drill string models in the wells with random curved axles with consideration of tension or compression forces and torque. In particular, support unit was rebuilt and made of steel profiles as rigid truss. Restriction of displacement of the one end of the

drill string model was get as result. Also, loading unit is modified by the additional pulleys. As result we got possibility to load opposite end of the drill string model by the tension or compression axial force. Resistive foil strain gauge method is used for indirect measuring of the stresses in the drill string model cross section. Statistical analysis of the results was operated by the Dixon's criterion that is used for small experimental data samples. It gave possibility to separate incorrect values of the voltage on the resistive foil strain gauges and doesn't use them for calculation of the stresses in the cross section of the drill pipe or its model. Was mentioned that further improving of the test bench construction will consist of adding of the electric motor for possibility of rotation of the drill string model and providing of the experiment in the dynamic mode.

Key words: drill string model; laboratory test bench; stress-strain state.

Вступ

У процесі поглиблення свердловин бурильна колона може деформуватися під впливом діючих зусиль. Мова йде про згин, кручення, розтяг і стиск. При цьому в її поперечному перерізі виникатимуть нормальні та дотичні напруження, що можуть перевищувати границю як втомної, так і статичної міцності матеріалу бурильних труб. Як наслідок – важкі аварії, на усунення наслідків яких необхідні проведення ловильних робіт, буріння додаткових, а, інколи, й нових стовбурів свердловин. Тож, інженери, які займаються проєктуванням і експлуатацією бурильних колон, повинні обов'язково контролювати їх напружено-деформований стан, щоб забезпечити безперебійну та ефективну роботу.

Зважаючи на виняткову важливість даного завдання, шляхи його розв'язання широко представлені в літературі. Розглянемо деякі з них.

Аналіз сучасних закордонних і вітчизняних досліджень та публікацій

Загалом, є два методи вирішення проблеми оцінки напружено-деформованого стану бурильної колони: 1) математичне моделювання; 2) фізичне моделювання.

Математичне моделювання передбачає представлення системи «бурильна колона – стовбур свердловини» у вигляді формул і рівнянь різної складності та відповідності реальним умовам [1, 2]. Загалом, чим складніша математична модель, тим більше вона відповідає натурному об'єкту, яким є бурильна колона в стовбурі свердловини, однак з підвищенням складності моделі все важче отримати її розв'язки, що, безумовно, є суттєвим недоліком даного підходу.

Як зазначено вище, альтернативним шляхом оцінки деформацій і напружень, що виникають у бурильних колонах під час їх експлуатації, є фізичне моделювання. Цей метод дослідження використовує фізичні моделі для вивчення поведінки реальних систем або явищ в умовах, які можуть бути складними або непридатними для дослідження безпосередньо. Даний підхід хоч і, в більшості випадків, дорого-

вартісний і непростий для реалізації, втім не потребує операцій із складним математичним апаратом. Це, безумовно, є суттєвою перевагою, яка зумовила значне поширення фізичного моделювання системи «бурильна колона – стовбур свердловини» в науковому середовищі.

Наприклад, в роботах [3, 4] авторами проведено лабораторні дослідження кутових коливань і вібрацій моделі бурильної колони, спричинених ковзанням долота вибоєм. При цьому вважалося, що стовбур свердловини є вертикальний прямолінійний, а наявність його стінок не враховувалася. Подібний лабораторний експеримент відображено в науковій статті [5].

Дослідження, відображені в роботах [6, 7], спрямовані на вивчення обертання моделі бурильної колони у вертикальному прямолінійному стовбурі свердловини, але вже з врахуванням обмежувальної дії його стінки.

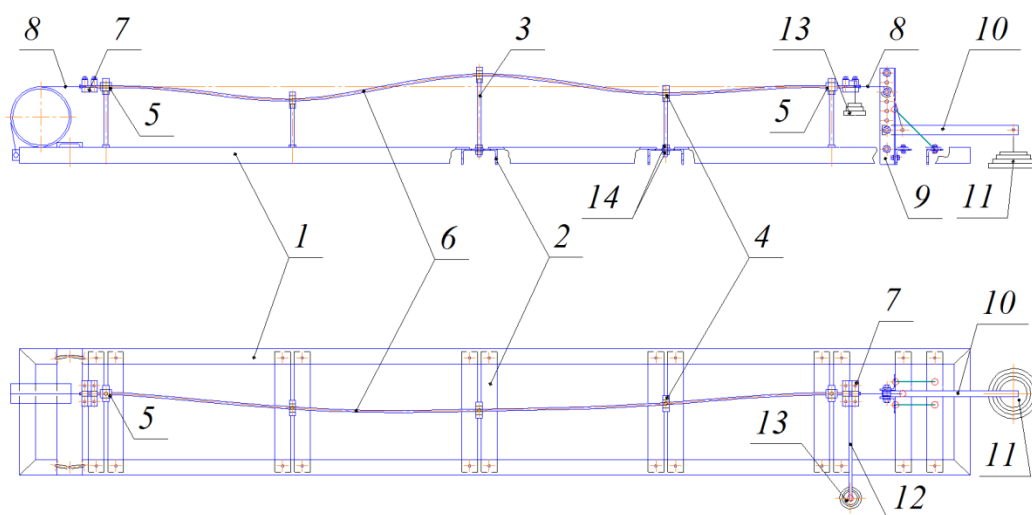
В науковій статті [8] описано проведення експериментальних досліджень деформації бурильної колони при її стисканні та обертанні в горизонтальному прямолінійному стовбурі свердловини, враховуючи тертя до його стінок (рис. 1).



Рисунок 1 – Загальний вигляд експериментального стенду

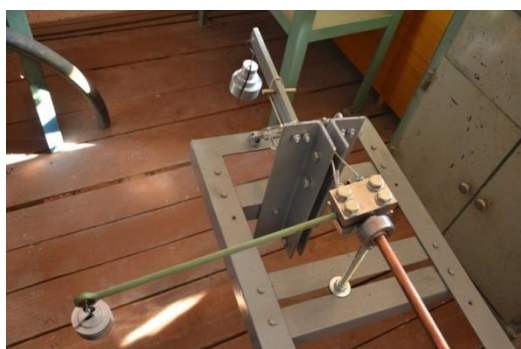
В праці [6] також описано лабораторний стенд, який дає змогу моделювати роботу бурильної колони у довільно нахиленому прямолінійному стовбурі свердловини, враховуючи обмежуючу дію стінок.

В роботі [9] авторами запропоновано конструкцію, виготовлено та проведено експериментальні дослідження напружено-деформованого стану ділянки бурильної колони в довільно викривленому стовбурі свердловини із вра-



1 – рама; 2 – напрямні; 3 – стрижні з метричною різью; 4 – імітатор стінки свердловини;
 5 – центрувальні втулки; 6 – модель трубної колони; 7 – фіксатори; 8 – тросик;
 9 – кутники навантажувального вузла; 10 – важіль для створення осьової сили;
 11 – тягарці для створення осьової сили; 12 – важіль для створення крутного моменту;
 13 – тягарці для створення крутного моменту; 14 – фіксуючі гайки

Рисунок 2 – Конструктивна схема експериментального стенду



а)



б)

а) – навантажувальний вузол; б) – опорний вузол

Рисунок 3 – Загальний вигляд навантажувального та опорного вузлів

хуваннями обмежувальної дії стінок, сили розтягу та крутного моменту. Конструктивну схему, а також загальний вигляд навантажувального та опорного вузлів експериментального обладнання відображено на рисунках 2 та 3.

Висвітлення невирішених раніше частин загальної проблеми

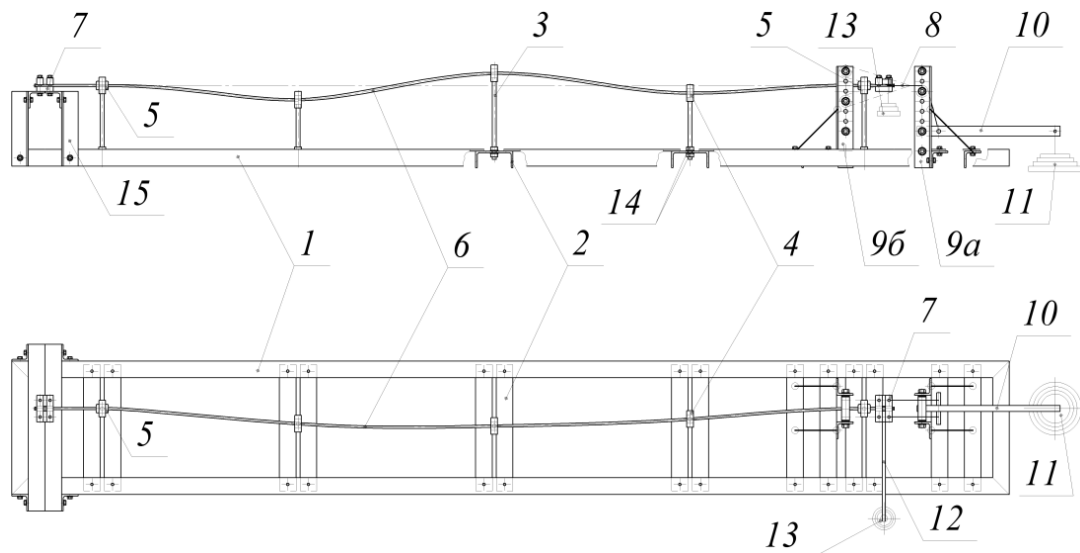
Опираючись на викладений вище матеріал, можемо дійти висновку, що основна увага наукової спільноти зосереджена на вивченні роботи бурильної колони у вертикальному або нахиленому прямолінійному стовбурі свердловини. В той же час, питання лабораторного моделювання її згину в свердловинах із довільно викривленою віссю при навантаженні зусиллями, близькими до реальних умов експлуатації, залишається відкритим.

Метою та завданням досліджень є створення лабораторного експериментального стенду для дослідження напружено-деформованого стану моделі ділянки бурильної колони з наміром:

- моделювання свердловин із довільною кривиною осі;
- врахування обмежувальної дії стінок свердловин;
- навантажування моделі ділянки бурильної колони осьовими силами розтягу або стиску, а також крутним моментом.

Висвітлення основного матеріалу дослідження

Для реалізації мети та завдань даної статті нами запропоновано модернізувати конструкцію експериментального стенду, розробленого



1 – рама; 2 – напрямні; 3 – стрижні з метричною різзю; 4 – імітатор стінки свердловини; 5 – центрувальні втулки; 6 – модель бурильної колони (в даному випадку мідна трубка з наповнювачем); 7 – фіксатори; 8 – тросик; 9а – кутники навантажувального вузла для створення осьової сили розтягу; 9б – кутники навантажувального вузла для створення осьової сили стиску; 10 – важіль для створення осьової сили; 11 – тягарці для створення осьової сили; 12 – важіль для створення крутного моменту; 13 – тягарці для створення крутного моменту; 14 – фіксуючі гайки; 15 – кутники опорного вузла

Рисунок 4 – Конструктивна схема модернізованого експериментального стенду



Рисунок 5 – Загальний вигляд модернізованого експериментального стенду

в роботі [9]. Для цього змінено його навантажувальний та опорний вузли [10]. В результаті, конструктивна схема та загальний вигляд модернізованого експериментального стенду набули вигляду, зображеного на рисунках 4 та 5.

Більш детально конструкцію навантажувального та опорного вузлів можна побачити на рисунках 6 та 7.

Для навантажування моделі крутним моментом використовується важіль, загальний вигляд якого наведено на рисунку 8.

Загалом, методологія проведення експерименту є наступною:

1) шляхом переміщення відносно рами 1, використовуючи напрямні 2, стрижні з метричною різзю 3 та фіксуючими гайками 14, імітатор стінки свердловини 4 виставляються у відповідності до інклінометрії інтервалу буріння свердловини, для якої проводяться дослідження (за необхідності раму 1 можна розмістити під довільним кутом до горизонту) (рис. 4);

2) модель бурильної колони 6 закріплюється за допомогою фіксатора 7 опорного вузла 15 та імітаторів стінки свердловини 4;

3) на протилежний від опорного вузла 15 кінець моделі бурильної колони 6 монтується

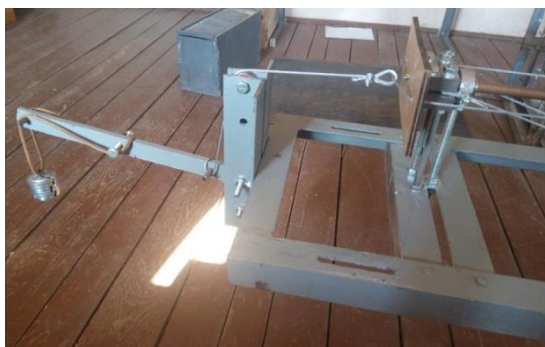


Рисунок 6 – Загальний вигляд навантажувального вузла



Рисунок 7 – Загальний вигляд опорного вузла

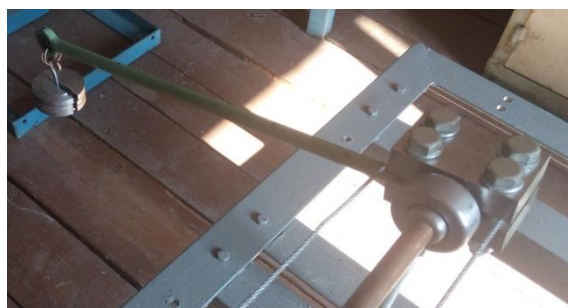


Рисунок 8 – Загальний вигляд важеля для створення крутного моменту

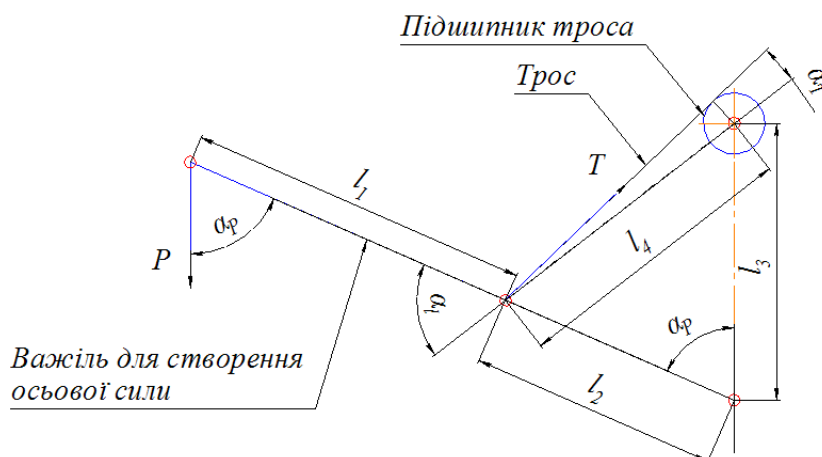


Рисунок 9 – Розрахункова схема для визначення ваги тягарців чи гир для створення осьової сили

фіксатор 7, важіль 12 і тягарці 13 для створення крутного моменту;

4) прикладається осьова сила розтягу за допомогою тросика 8, важеля для створення осьової сили 10, тягарців 11 і частини навантажувального вузла, яка монтується на кутниках 9а (якщо ж, тросик 8 перетягнути через ролики кутників 9б, модель бурильної колони 6 зазнаватиме стиску);

5) здійснюються вимірювання напруги на тензорезисторах та її перерахунок у величини нормальних напружень, що виникатимуть на моделі, а згодом і на натурній бурильній колоні в експлуатаційних умовах.

Однак, досвід експлуатації бурильних колон свідчить, що осьові зусилля в їх поперечному перерізі сягають суттєвих значень: десятки, а то й сотні тон. Для моделювання таких величин в лабораторних умовах потрібні тягарці чи гирі вагою 10 і більше кілограм. Це, безумовно, створює незручності при проведенні експериментів. Для їх усунення, навантажувальний вузол виконаний із важелем для створення осьової сили. Щоб визначити, якої ваги тягарці чи гирі (P) слід використовувати для прикладання необхідного зусилля розтягу чи стиску (T), використаємо наступну розрахункову схему (рис. 9).

Таблиця 1 – Рівності для визначення числових значень критеріїв перевірки крайніх величин

Обсяг вибірки	Аналіз на промах величини x_1	Аналіз на промах величини x_n
$3 \leq n \leq 7$	$r_{10} = \frac{x_2 - x_1}{x_n - x_1}$	$r_{10} = \frac{x_n - x_{n-1}}{x_n - x_1}$
$8 \leq n \leq 10$	$r_{11} = \frac{x_2 - x_1}{x_{n-1} - x_1}$	$r_{11} = \frac{x_n - x_{n-1}}{x_n - x_2}$
$11 \leq n \leq 13$	$r_{21} = \frac{x_3 - x_1}{x_{n-1} - x_1}$	$r_{21} = \frac{x_n - x_{n-2}}{x_n - x_2}$
$14 \leq n \leq 30$	$r_{22} = \frac{x_3 - x_1}{x_{n-2} - x_1}$	$r_{22} = \frac{x_n - x_{n-2}}{x_n - x_3}$

Геометричні розміри l_1, l_2, l_3, r_{nidu} (зовнішній радіус підшипника) та α_p є заданими та отримуються шляхом прямих вимірювань навантажувального вузла. Використовуючи теорему косинусів, визначимо довжину l_4 :

$$l_4 = \sqrt{l_2^2 + l_3^2 - 2l_2 l_3 \cos \alpha_p}.$$

Оскільки трос, вздовж якого напрямлена сила T , одночасно є дотичною до кола, що описує зовнішнє кільце підшипника, можемо записати:

$$\sin \alpha_T = \frac{r_{nidu}}{l_4} \text{ або } \alpha_T = \arcsin\left(\frac{r_{nidu}}{l_4}\right). \quad (1)$$

Відтак, опираючись на теорему синусів, отримуємо:

$$\frac{l_3}{\sin \alpha_l} = \frac{l_4}{\sin \alpha_p} \text{ або } \alpha_l = \arcsin\left(\frac{l_3 \sin \alpha_p}{l_4}\right). \quad (2)$$

І, насамкінець, привіняємо до нуля алгебраїчну суму моментів сил P та T навколо осі (чи точки) обертання важеля (див. рис. 9):

$$P(l_1 + l_2) \sin \alpha_p = T l_2 \sin(\alpha_T + \alpha_l). \quad (3)$$

Далі, враховуючи рівності (1 – 3), отримуємо

$$P = \frac{T l_2}{(l_1 + l_2) \sin \alpha_p} \times \sin\left(\arcsin\left(\frac{r_{nidu}}{l_4}\right) + \arcsin\left(\frac{l_3 \sin \alpha_p}{l_4}\right)\right).$$

Як зазначалося в наведеній вище методології проведення досліджень, після налаштування експериментального стенду, за допомогою аналого-цифрового перетворювача проводяться вимірювання напруги U на кожному з тензорезисторів, що наклеєні на моделі ділянки бурильної колони. Експеримент повторюється чотири рази. З метою статистичної оцінки на однорідність результатів цих вимірювань за-

стосовується критерій Діксона (r), який рекомендується для малих вибірок [11]. Для цього експериментальні дані слід розташувати у варіаційний ряд: $x_1 \leq x_2 \leq \dots \leq x_{n-1} \leq x_n$. Далі проводиться аналіз на промахи крайніх лівих або крайніх правих значень зазначеного варіаційного ряду. Рівності для визначення числових значень критеріїв перевірки крайніх величин $x_1 \leq x_2 \leq \dots \leq x_{n-1} \leq x_n$ при різних обсягах вибірки наведено в таблиці 1.

Якщо обчислена згідно із таблицею 1 величина критерію r більша від критичної r^* , то нульову гіпотезу відхиляють і відповідне крайнє значення вважають промахом та не використовують в подальших розрахунках. Критична величина критерію знаходиться за таблицею, наведеною в роботі [11].

Після того, як виміряні величини напруг пройшли статистичну перевірку, їх слід усереднити для кожного тензорезистора та використати для перерахунку у величину нормальних напружень σ_M в поперечному перерізі моделі бурильної колони за формулою [9]

$$\sigma_M = \frac{U + 0,511 \cdot 10^{-2}}{-0,163 \cdot 10^{-4}}.$$

Для отримання нормальних напружень σ_H в поперечному перерізі натурної бурильної колони в досліджуваному інтервалі, слід застосовувати пропорції [9]

$$\frac{\sigma_M \mu_M}{q_M} = \frac{\sigma_H \mu_H}{q_H}, \quad \mu_M = \sqrt[3]{\frac{EI_M}{q_M}}, \quad \mu_H = \sqrt[3]{\frac{EI_H}{q_H}},$$

де EI – жорсткість на згин;

q – вага одиниці довжини;

μ – довжина однієї безрозмірної одиниці ваги.

Параметри, які стосуються моделі, позначено індексом «М», натурного об'єкту – «Н».

Висновки

Проведено модернізацію навантажувального та опорного вузлів експериментального стенду для дослідження напружено-деформованого стану моделей ділянок бурильних колон, що знаходяться у свердловинах з довільно викривленою віссю. Це дозволило навантажувати їх осьовою силою як розтягу, так і стиску, а також крутним моментом. В результаті, з'явилася можливість в лабораторних умовах аналізувати напружено-деформований стан як розтягнутих, так і стиснених частин бурильних колон під час їх експлуатації.

В той же час, запропонований підхід реалізовано, використовуючи фізичне моделювання об'єкта та предмету дослідження. Це забезпечує пряму відповідність між бурильною колоною та її моделлю й дозволяє отримати достовірні результати під час аналізу напружено-деформованого стану.

Надалі планується оснастити експериментальний стенд електродвигуном для проведення описаних вище експериментів у динамічній постановці.

Література

1. Rachkevych R.V. Drill string intense-deformed state on well section with “dog-legs”. *Journal of hydrocarbon power engineering*. 2014. Vol. 1, Iss. 2. P. 89–95.
2. Raçkeviç R.V., Çudık İ.İ., Raçkeviç İ.A., Al-Tanakçı Ahmed. Kaverna ilə quyu intervalında qazma kəmərinin sahəsinin gərginlik-deformasiya vəziyyətinin təhlili. *SOCAR Proceedings Special Issue*. 2022. No. 2. P. 001 – 008.
3. Vahid Vaziri, Ibukunolu O. Oladunjoye, Marcin Kapitaniak, Summet S. Alhale, Marian Wiercigroch. Parametric analysis of a sliding-mode controller to suppress drill-string stick-slip vibration. *Meccanica*. 2020. No 55. P. 2475–2492.
4. James D.J. MacLean, Vahid Vaziri, Sumeet S. Aphale, Marian Wiercigroch. Feedback control method to suppress stick-slip in drill-strings featuring delay and actuation constraints. *The European Physical Journal. Spec. Top.* 2021. No 230. P. 3627 – 3642.
5. Yang Liu, Joseph Paez Chavez, Rulston De Sa, Scott Walker. Numerical and experimental studies of stick-slip oscillations in drill-strings. *Nonlinear Dyn.* 2017. No 9. P. 2959 – 2978.
6. Saket Srivastava, Catalin Teodoriu. An extensive review of laboratory scaled experimental setups for studying drill string vibrations and the way forward. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2019. No 182. 10 p.

7. Khulief Y. A., Al-Sulaiman F. A. Laboratory investigation of drillstring vibrations. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*. 2009. Vol. 223, Iss. 10. P. 2249 – 2262.

8. Fushen Ren, Baojin Wang, Lei Zhao, Anhe Zhu. Experimental Investigation and Analysis of Dynamic Buckling of Drill String in Horizontal Well. *Hindawi Shock and Vibration*. 2017. 15 p.

9. Rachkevych R., Ivasiv V., Bui V., Yurych L., Rachkevych I. Laboratory research of the stress-strain state of the drill string in the local bend of the well. *Technology audit and production reserves*. 2019. No 1/1 (45). P. 15 – 24.

10. Рачкевич І.О. Тривимірне моделювання напружено-деформованого стану колони бурильних труб у криволінійному стовбурі свердловини. *Science – the Future of the Word: The 5th International scientific and practical conference (Prague, June 23–24. 2020)*. Prague, 2020. P. 131–136

11. Свєрдан П.Л. Вища математика. Математичний аналіз і теорія ймовірностей: Підручник. Київ, 2008. 450 с.

References

1. Rachkevych R.V. Drill string intense-deformed state on well section with “dog-legs”. *Journal of hydrocarbon power engineering*. 2014. Vol. 1, Iss. 2. P. 89–95.
2. Raçkeviç R.V., Çudık İ.İ., Raçkeviç İ.A., Al-Tanakçı Ahmed. Kaverna ilə quyu intervalında qazma kəmərinin sahəsinin gərginlik-deformasiya vəziyyətinin təhlili. *SOCAR Proceedings Special Issue*. 2022. No. 2. P. 001 – 008. [in Azerbaijan]
3. Vahid Vaziri, Ibukunolu O. Oladunjoye, Marcin Kapitaniak, Summet S. Alhale, Marian Wiercigroch. Parametric analysis of a sliding-mode controller to suppress drill-string stick-slip vibration. *Meccanica*. 2020. No 55. P. 2475–2492.
4. James D.J. MacLean, Vahid Vaziri, Sumeet S. Aphale, Marian Wiercigroch. Feedback control method to suppress stick-slip in drill-strings featuring delay and actuation constraints. *The European Physical Journal. Spec. Top.* 2021. No 230. P. 3627 – 3642.
5. Yang Liu, Joseph Paez Chavez, Rulston De Sa, Scott Walker. Numerical and experimental studies of stick-slip oscillations in drill-strings. *Nonlinear Dyn.* 2017. No 9. P. 2959 – 2978.
6. Saket Srivastava, Catalin Teodoriu. An extensive review of laboratory scaled experimental setups for studying drill string vibrations and the way forward. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2019. No 182. 10 p.

7. Khulief Y. A., Al-Sulaiman F. A. Laboratory investigation of drillstring vibrations. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*. 2009. Vol. 223, Iss. 10. P. 2249 – 2262.

8. Fushen Ren, Baojin Wang, Lei Zhao, Anhe Zhu. Experimental Investigation and Analysis of Dynamic Buckling of Drill String in Horizontal Well. *Hindawi Shock and Vibration*. 2017. 15 p.

9. Rachkevych R., Ivasiv V., Bui V., Yurych L., Rachkevych I. Laboratory research of the stress-strain state of the drill string in the local bend of the well. *Technology audit and production reserves*. 2019. No 1/1 (45). P. 15 – 24.

10. Rachkevych I.O. Tryvymirne modeliuвання napruzheno-deformovanoho stanu kolony burylnykh trub u kryvoliniinomu stovburi sverdlovyny. *Science – the Future of the Word: The 5th International scientific and practical conference* (Prague, June 23–24. 2020). Prague, 2020. P. 131–136. [in Ukrainian]

11. Sverdani P.L. Vyshcha matematika. Matematychnyi analiz i teoriia ymovirnostei: Pidruchnyk. Kyiv, 2008. 450 p. [in Ukrainian]