

Міністерство освіти і науки України
Національний університет «Одеська морська академія»

Кваліфікаційна наукова праця
на правах рукопису

Мар'янов Денис Миколайович

УДК 629.526

ДИСЕРТАЦІЯ

**УДОСКОНАЛЕННЯ СИСТЕМИ ЗБЕРІГАННЯ ТА ЦИРКУЛЯЦІЇ
БУРИЛЬНОЇ СУСПЕНЗІЇ НА СУДНАХ ТИПУ PSV**

Спеціальність 271 – Морський та внутрішній водний транспорт

Галузь знань 27 – Транспорт

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

(Д. М. Мар'янов)

Науковий керівник:
Кар'янський Сергій Анатолійович,
кандидат технічних наук, доцент

Одеса – 2022

АНОТАЦІЯ

Мар'янов Д.М. Удосконалення системи зберігання та циркуляції бурильної суспензії на суднах типу PSV.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 271 – Морський та внутрішній водний транспорт (галузь знань 27 – Транспорт). – Національний університет «Одеська морська академія» Міністерства освіти і науки України, Одеса, 2022.

Дисертаційне дослідження спрямоване на розв'язання науково-прикладного завдання – удосконалення системи зберігання та циркуляції бурильної суспензії під час її транспортування на суднах типу PSV шляхом забезпечення додаткової Х-подібної циркуляції та підтримки реологічних характеристик бурильної суспензії.

Головною мотивацією досліджень є сьогоденна наявність **запитів практики:**

- необхідність підтримання функціональних характеристик бурильних суспензій під час їхнього транспортування суднами типу PSV;
- зниження енергетичних втрат на процес перекачування (видачу / приймання) бурильної суспензії з борту судна на нафтовидобувну платформу;
- забезпечення технічного стану суднової системи зберігання та транспортування бурильної суспензії.

Головне завдання наукового дослідження полягає в удосконаленні системи зберігання та циркуляції бурильної суспензії під час її транспортування на суднах типу PSV та визначення способу забезпечення її функціональних характеристик.

Для розв'язання головного завдання дослідження з'ясовані наступні **допоміжні завдання:**

1) визначення діапазону латентної зміни реологічних характеристик бурильної суспензії під час її збереження та транспортування морськими спеціалізованими суднами типу PSV;

2) визначення кількісного та якісного критерію оцінки зміни реологічних характеристик бурильної суспензії під час її транспортування суднами типу PSV;

3) визначення впливу додаткової примусової Х-подібної циркуляції бурильної суспензії на її реологічні характеристики;

4) визначення схеми встановлення додаткового обладнання, за якою забезпечуються мінімальні гідравлічні та енергетичні втрати в системі зберігання та циркуляції бурильної суспензії.

У результаті розв'язання головного та допоміжних завдань сформульовано **наукове положення**: удосконалення системи зберігання та циркуляції бурильної суспензії під час її транспортування на судах типу PSV забезпечується шляхом керованого впливу на густину та седиментаційну стійкість бурильної суспензії за умовами створення додаткової Х-подібної циркуляції бурильної суспензії обсягом вантажних танків, подачею повітря в нижню частину вантажного танка та енергоефективними режимами експлуатації обладнання, яке при цьому використовується.

Наукове положення обґрунтоване **науковими результатами, вперше**:

- встановлено діапазон латентної зміни густини бурильної суспензії під час її транспортування на судах типу PSV, який у верхній частині вантажного танку складає 7,85...22,45 % та зумовлює полегшування бурильної суспензії, в нижній частині танку – 10,94...30,76 % та зумовлює обважнювання бурильної суспензії;

- запропоновано як кількісний критерій оцінки зміни реологічних характеристик бурильної суспензій під час її транспортування суднами типу PSV приймати її густину, як якісну – седиментаційну стійкість, кількісну оцінку цих показників визначати площею під залежністю $\rho=f(t)$, $\Delta\rho=f(t)$, де ρ ,

$\Delta\rho$, t – густина, седиментаційна стійкість, час транспортування бурильної суспензії;

- доведена доцільність використання додаткової примусової Х-подібної циркуляції бурильної суспензії, яка забезпечує 7-ми кратне підвищення седиментаційної стійкості бурильної суспензії та використання комплексного методу, який полягає в одночасному забезпеченні примусової Х-подібної циркуляції бурильної суспензії та подачею повітря в нижню частину вантажного танка, що сприяє 13,5-ти кратному підвищенню седиментаційної стійкості бурильної суспензії;

- розроблена схема розташування додаткового мобільного обладнання, що забезпечує зберігання, циркуляцію та перекачування бурильної суспензії з мінімальними гідравлічними та енергетичними втратами, та запропонована технологія перекачування бурильної суспензії на нафтовидобувну платформу з урахуванням особливостей суден типу PSV.

Удосконалено:

- спосіб підтримання седиментаційної стійкості бурильної суспензії, що відрізняється від існуючих встановленням діапазону її автоматичного регулювання;

- критерій оцінювання якості перебігу процесу транспортування бурильної суспензії, що, на відміну від існуючих, враховує швидкість зміни її седиментаційної стійкості.

Отримала подальший розвиток:

- методика автоматичного регулювання седиментаційної стійкості бурильної суспензії, що враховує можливість її виконання за допомоги мікроконтролерів;

- методика визначення енергетичної ефективності процесу перекачування бурильної суспензії на нафтовидобувну платформу, яка враховує відносну продуктивність вантажних насосів та час перекачування бурильної суспензії.

Практичне значення отриманих результатів полягає у наступному:

- підтримка експлуатаційних характеристик бурильної суспензії під час її транспортування суднами типу PSV забезпечується автоматичним регулюванням значення седиментаційної стійкості бурильної суспензії у діапазоні 2...7 %;

- технологія забезпечення примусової Х-подібної циркуляції бурильної суспензії, а також комплексного методу, що поєднує примусову Х-подібну циркуляцію бурильної суспензії та подачу стисненого повітря в нижню частину вантажного танку, доцільно використовувати на всіх судах типу PSV; використання цих технологій можливе поширити на інші типи морських суден з метою керованого впливу на функціональні характеристики важких палив, які на них використовуються, зберігаються та транспортуються.

Ключові слова: судна морського транспорту типу PSV, бурильна суспензія, густина, седиментаційна стійкість, енергетична ефективність.

Список опублікованих праць за темою дисертації

Статті у наукових фахових виданнях України, що входять до переліку наукових фахових видань України, в яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора наук, кандидата наук та ступеня доктора філософії

1. Карьянский С.А. Обеспечение эксплуатационных характеристик высокоплотных технических жидкостей при их транспортировке морскими судами / С.А. Карьянский, Д.Н. Марьянов // Вісник Одеського національного морського університету : Зб. наук. праць, 2020. – Вип. 1(61). – С. 97-105. doi.org/10.47049/2226-1893-2020-1-97-105.

2. Maryanov D. Development of a method for maintaining the performance of drilling fluids during transportation by Platform Supply Vessel / D. Maryanov // Technology Audit and Production Reserves. – 2021. – №5(2(61)). – С. 15-20. doi: http://doi.org/10.15587/2706-5448.2021.239437.

3. Карьянский С.А. Регулирование плотности бурильной суспензии при ее транспортировке судами класса Platform Supply Vessels / С.А. Карьянский, Д.Н. Марьянов // Автоматизация судовых технических средств : наук. -техн. сб. – 2021. – Вып. 27. – Одеса : НУ «ОМА». – С. 52 - 62. DOI: 10.31653/1819-3293-2021-1-27-52-62.

4. Maryanov D. Control and regulation of the density of technical fluids during their transportation by sea specialized vessels / D. Maryanov // Technology Audit and Production Reserves. – 2022. – № 1(2(63)). – P. 19-25. doi: <http://doi.org/10.15587/2706-5448.2022.252336>.

5. Мар'янов Д.М. Удосконалення системи зберігання та циркуляції бурильної суспензії на судах типу Platform Supply Vessel / Д.М. Мар'янов // Суднові енергетичні установки: науково-технічний збірник. Вип. 43. – Одеса: НУ «ОМА». – 2021. – С. 54 - 68. doi: 10.31653/smf343.2021.54-68.

6. Maryanov D. Reduced energy losses during transportation of drilling slurry by Platform Supply Vessels / D. Maryanov // Technology Audit and Production Reserves. – 2022. – № 2(1(64)). – С. 42–50. doi: <http://doi.org/10.15587/2706-5448.2022.256473>.

Статті в іноземних виданнях країни ЄС:

7. Maryanov D.M. Maintaining the efficiency of drilling fluids when they are transported by platform supply vessels class offshore vessels / D.M. Maryanov // Austrian Journal of Technical and Natural Sciences. Scientific journal. – 2021. – № 7–8 (July – August). – P. 22-28. <https://doi.org/10.29013/AJT-21-7.8-22-28>.

Статті у збірках матеріалів наукових конференцій

8. Karianskyi S.A. Features of transportation of high-density technical liquids by marine specialized vessels / S.A. Karianskyi, D.M. Maryanov // Materials of the International Conference “Scientific research of the SCO countries: synergy and integration January 25, 2020. Part 2. Beijing, PRC. – P. 150-153. DOI. 10.34660/INF. 2020.24.53688.

9. Марьянов Д.Н. Оптимизация работы MUD systems морских специализированных судов / Д.Н. Марьянов // Морський та річковий флот :

експлуатація і ремонт : Матеріали Міжнародної науково-технічної конференції, 18.03.2020-19.03.2020 – Одеса : Національний університет «Одеська морська академія», 2020. – С. 117-120.

10. Марьянов Д.Н. Обеспечение функциональных свойств и эксплуатационных характеристик технических жидкостей, транспортируемых морскими судами / Д.Н. Марьянов // Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті : Матеріали XII Міжнародної науково-практичної конференції MINTT-2020, 27-29 травня 2020 р. – Херсон : Херсонська державна морська академія. – 2020. – С. 261-265.

11. Карьянский С.А. Поддержание реологических характеристик технических жидкостей при их длительной транспортировке / С.А. Карьянский, Д.Н. Марьянов // Матеріали II Міжнародної науково-практичної морської конференції кафедри СЕУ і ТЕ Одеського національного морського університету (MPP&O-2020 –Marine Power Plants and Operation), квітень 2020. – Одеса : Одеський національний морський університет. – С. 202-206.

12. Мар'янов Д.М. Підтримка функціональних характеристик багатокомпонентних технічних рідин / Д.М. Мар'янов // Матеріали 11-ї Міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні енергетичні установки на транспорті і технології та обладнання для їх обслуговування» , 08-10 вересня 2020 р. – Херсон : Херсонська державна морська академія. – 2020. – С. 161-164.

13. Мар'янов Д.М. Обработка углеводных рідин під час їх перевезення на судах річкового та морського транспорту // Матеріали науково-технічної конференції «Морський та річковий флот : експлуатація і ремонт», 25.03.2021 -26.03.2021. – Одеса : Національний університет «Одеська морська академія», 2021.– С. 97-99.

14. Марьянов Д.Н. Совершенствование эксплуатации системы перевозки буровой суспензии на судах, обеспечивающих работу нефтяных платформ / Д.Н. Марьянов // Матеріали 12-ї Міжнародної науково-практичної

конференції «Сучасні енергетичні установки на транспорті і технології та обладнання для їх обслуговування», 06-08 вересня 2021 р. – Херсон : Херсонська державна морська академія. – 2021. – С. 170-173.

15. Мар'янов Д.М. Підтримка густини та седиментаційної стійкості технічних рідин, що транспортуються морськими суднами / Д.М. Мар'янов // Матеріали X Міжнародної науково-технічної конференції «Суднова енергетика: стан та проблеми», 4–5 листопада 2021 року. Націон. ун-т кораблебудування, Миколаїв, 2021. – С. 231-234.

16. Мар'янов Д.М. Зниження енергетичних втрат в системі транспортування бурильної суспензії суден класу PSV / Д.М. Мар'янов // Матеріали науково-технічної конференції «Морський та річковий флот : експлуатація і ремонт», 24.03.2022 -25.03.2022. – Одеса : Національний університет «Одеська морська академія», 2022.– С. 78-84.

17. Maryanov D. Optimization of the work of Platform Supply-class Vessel / D. Maryanov, S. Karianskyi // Student International Scientific Conference Batumi Navigation Teaching University, Batumi, Georgia, 17.05.2022.

З наукових робіт, опублікованих у співавторстві, автору належать особисто:

[1], [3] – удосконалення суднової системи зберігання та циркуляції бурильної суспензії, проведення експериментальних досліджень, обробка та аналіз результатів експерименту, розробка рекомендацій щодо впровадження результатів дослідження;

[8] – налагодження експериментального обладнання, проведення експериментальних досліджень та обробка їхніх результатів;

[11, 17] – розробка алгоритму проведення експериментальних досліджень, удосконалення суднової системи зберігання та циркуляції бурильної суспензії, проведення експериментальних досліджень та обробка їхніх результатів.

ANNOTATION

Maryanov D. Improvement of storage and circulation system of drilling suspension on PSV type ships – Qualifying scientific work as manuscript.

Dissertation for the scientific level of Doctor of Philosophy for Programme Subject Area 271 – Maritime and inland water transport (Field of Study 27 – Transport services). – National University "Odessa Maritime Academy" of the Ministry of Education and Science of Ukraine, Odesa, 2022.

Dissertation research is aimed to solve a scientific and applied problem - improvement of drilling slurry storage and circulation system during its transportation on PSV type vessels by providing additional X-shaped circulation and maintaining rheological characteristics of drilling suspension.

Dissertation research is aimed to solve a scientific and applied problem - improvement of drilling suspension storage and circulation system during its transportation on PSV type vessels by providing additional X-shaped circulation and maintaining rheological characteristics of drilling suspension.

The main motivation for the research is the current existence of **practice requests**:

- the need to maintain the functional performance of drilling slurries during their transportation by PSV type vessels;
- reduction of energy losses in the process of pumping (dispensing/receiving) drill suspension from the vessel to the oil production platform;
- assurance of technical condition of shipboard storage and transportation of drilling suspension.

The main objective of the research is to improve suspension storage and circulation system during its transportation on board PSV type vessels and to determine method to ensure their functional characteristics.

To solve the main task of the research, the following **auxiliary tasks** are elucidated:

- 1) determination of the range of latent change in rheological characteristics of drilling suspension during its preservation and transportation by PSV type offshore specialised vessels;
- 2) determination of quantitative and qualitative criteria for evaluation of changes in rheological properties of the drilling suspension during its transportation by PSV type vessels;
- 3) determination of the effect of additional forced X-shape circulation of drilling suspension on its rheological characteristics;
- 4) determination of scheme of additional equipment installation, which provides minimum hydraulic and energy losses in drilling suspension storage and circulation system.

As a result of solving the main and auxiliary tasks the following **scientific position** is formulated: improvement of storage and circulation system of drilling suspension during its transportation on PSV type vessels is provided by controlled influence on density and sedimentation stability of drilling suspension under the conditions of creation of additional X-shaped circulation cargo tanks, air supply to the bottom of cargo tank and energy efficient operation modes of used equipment.

The scientific position is substantiated by **scientific results, for the first time**:

- the range of latent change of drilling suspension's density during its transportation by PSV type vessels is established. It makes 7.9–22.5 % in the upper part of cargo tank and causes lightening of drilling suspension, and 10.4–30.8 % in the lower part of tank and causes weighting of drilling suspension;
- it is suggested as a quantitative criterion for evaluation of changes in rheological properties of the drilling suspension during its transportation by PSV type vessels to take its density as a qualitative one – sedimentation resistance; quantitative evaluation of these indicators is defined by area under dependence

$\rho=f(t)$, $\Delta\rho=f(t)$, where, ρ , $\Delta\rho$, t – density, sedimentation resistance, time of drill suspension transportation;

- expediency of additional forced X-shape circulation of drilling suspension is proved. It provides 7-fold increase of sedimentation stability of drilling suspension and use of integrated method, consisting in simultaneous provision of forced X-shape circulation of drilling suspension and air supply, that contributes 13.5-fold increase of sedimentation stability of drilling suspension;

- the layout of additional mobile equipment providing storage, circulation and pumping of drilling suspension with minimum hydraulic and energy losses was developed and the technology of drilling suspension pumping to the oil producing platform was proposed, taking into account peculiarities of PSV type vessels.

Improved:

- method of maintaining sedimentation stability of drilling suspension, differing from the existing ones by setting its automatic control range;

- quality assessment criteria of the drilling suspension transport process, which, unlike the existing ones, takes into account the rate of change in its sedimentation stability.

Received further development:

- method of automatic regulation of sedimentation stability of drilling suspension, which takes into account the possibility of its implementation with the help of microcontrollers;

- method of determining the energy efficiency of the drilling suspension pumping process on the oil production platform, which takes into account the relative capacity of cargo pumps and the time of pumping the drilling suspension.

There was further developed:

- methodology of automatic regulation of the sedimentation stability of the drilling suspension, taking into account the possibility of its performance by means of microcontrollers;

- methodology for determining the energy efficiency of the drilling suspension pumping process to the oil production platform, taking into account the relative productivity of the cargo pumps and the time of pumping the drilling suspension.

Practical significance of the obtained results is as follows:

- the support of drilling suspension performance during its transportation by PSV type vessels is provided by automatic regulation of drilling suspension sedimentation stability value in the range of 2–7 %;

- technology of providing forced X-shape circulation of drilling suspension as well as complex method combining forced X-shape circulation of drilling suspension and compressed air supply to the bottom of the cargo tank is expedient to use on all PSV type vessels; use of these technologies can be extended to other types of seagoing vessels in order to influence functional characteristics of heavy fuel used, stored and transported on them.

Key words: PSV type vessels, drilling suspension, density, sedimentation resistance, energy efficiency.

List of published works on the topic of the dissertation

Articles in scientific professional publications of Ukraine included in the list scientific professional publications of Ukraine, which may publish the results of dissertations for the degree of Doctor of Sciences, Candidate of Sciences and Doctor of Philosophy

1. Карьянский С.А. Обеспечение эксплуатационных характеристик высокоплотных технических жидкостей при их транспортировке морскими судами / С.А. Карьянский, Д.Н. Марьянов // Вісник Одеського національного морського університету : Зб. наук. праць, 2020. – Вип. 1(61). – С. 97-105. doi.org/10.47049/2226-1893-2020-1-97-105.

2. Maryanov D. Development of a method for maintaining the performance of drilling fluids during transportation by Platform Supply Vessel / D. Maryanov // Technology Audit and Production Reserves. – 2021. – №5(2(61)). – С. 15-20. doi: http://doi.org/10.15587/2706-5448.2021.239437.

3. Карьянский С.А. Регулирование плотности бурильной суспензии при ее транспортировке судами класса Platform Supply Vessels / С.А. Карьянский, Д.Н. Марьянов // Автоматизація суднових технічних засобів : наук. -техн. зб. – 2021. – Вип. 27. – Одеса : НУ «ОМА». – С. 52 - 62. DOI: 10.31653/1819-3293-2021-1-27-52-62.

4. Maryanov D. Control and regulation of the density of technical fluids during their transportation by sea specialized vessels / D. Maryanov // Technology Audit and Production Reserves. – 2022. – № 1(2(63)). – P. 19-25. doi: <http://doi.org/10.15587/2706-5448.2022.252336>.

5. Мар'янов Д.М. Удосконалення системи зберігання та циркуляції бурильної суспензії на суднах типу Platform Supply Vessel / Д.М. Мар'янов // Суднові енергетичні установки: науково-технічний збірник. Вип. 43. – Одеса: НУ «ОМА». – 2021. – С. 54 - 68. doi: 10.31653/smf343.2021.54-68.

6. Maryanov D. Reduced energy losses during transportation of drilling slurry by Platform Supply Vessels / D. Maryanov // Technology Audit and Production Reserves. – 2022. – № 2(1(64)). – С. 42–50. doi: <http://doi.org/10.15587/2706-5448.2022.256473>.

Articles in foreign publications of the EU:

7. Maryanov D.M. Maintaining the efficiency of drilling fluids when they are transported by platform supply vessels class offshore vessels / D.M. Maryanov // Austrian Journal of Technical and Natural Sciences. Scientific journal. – 2021. – № 7–8 (July – August). – P. 22-28. <https://doi.org/10.29013/AJT-21-7.8-22-28>.

Articles in collections of materials of scientific conferences

8. Karianskyi S.A. Features of transportation of high-density technical liquids by marine specialized vessels / S.A. Karianskyi, D.M. Maryanov // Materials of the International Conference “Scientific research of the SCO countries: synergy and integration January 25, 2020. Part 2. Beijing, PRC. – P. 150-153. DOI. 10.34660/INF. 2020.24.53688.

9. Марьянов Д.Н. Оптимизация работы MUD systems морских специализированных судов / Д.Н. Марьянов // Морський та річковий флот :

експлуатація і ремонт : Матеріали Міжнародної науково-технічної конференції, 18.03.2020-19.03.2020 – Одеса : Національний університет «Одеська морська академія», 2020. – С. 117-120.

10. Марьянов Д.Н. Обеспечение функциональных свойств и эксплуатационных характеристик технических жидкостей, транспортируемых морскими судами / Д.Н. Марьянов // Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті : Матеріали XII Міжнародної науково-практичної конференції MINTT-2020, 27-29 травня 2020 р. – Херсон : Херсонська державна морська академія. – 2020. – С. 261-265.

11. Карьянский С.А. Поддержание реологических характеристик технических жидкостей при их длительной транспортировке / С.А. Карьянский, Д.Н. Марьянов // Матеріали II Міжнародної науково-практичної морської конференції кафедри СЕУ і ТЕ Одеського національного морського університету (MPP&O-2020 –Marine Power Plants and Operation), квітень 2020. – Одеса : Одеський національний морський університет. – С. 202-206.

12. Мар'янов Д.М. Підтримка функціональних характеристик багатокомпонентних технічних рідин / Д.М. Мар'янов // Матеріали 11-ї Міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні енергетичні установки на транспорті і технології та обладнання для їх обслуговування» , 08-10 вересня 2020 р. – Херсон : Херсонська державна морська академія. – 2020. – С. 161-164.

13. Мар'янов Д.М. Обработка углеводных рідин під час їх перевезення на судах річкового та морського транспорту // Матеріали науково-технічної конференції «Морський та річковий флот : експлуатація і ремонт», 25.03.2021 -26.03.2021. – Одеса : Національний університет «Одеська морська академія», 2021.– С. 97-99.

14. Марьянов Д.Н. Совершенствование эксплуатации системы перевозки буровой суспензии на судах, обеспечивающих работу нефтяных платформ / Д.Н. Марьянов // Матеріали 12-ї Міжнародної науково-практичної

конференції «Сучасні енергетичні установки на транспорті і технології та обладнання для їх обслуговування», 06-08 вересня 2021 р. – Херсон : Херсонська державна морська академія. – 2021. – С. 170-173.

15. Мар'янов Д.М. Підтримка густини та седиментаційної стійкості технічних рідин, що транспортуються морськими суднами / Д.М. Мар'янов // Матеріали X Міжнародної науково-технічної конференції «Суднова енергетика: стан та проблеми», 4–5 листопада 2021 року. Націон. ун-т кораблебудування, Миколаїв, 2021. – С. 231-234.

16. Мар'янов Д.М. Зниження енергетичних втрат в системі транспортування бурильної суспензії суден класу PSV / Д.М. Мар'янов // Матеріали науково-технічної конференції «Морський та річковий флот : експлуатація і ремонт», 24.03.2022 -25.03.2022. – Одеса : Національний університет «Одеська морська академія», 2022.– С. 78-84.

17. Maryanov D. Optimization of the work of Platform Supply-class Vessel / D. Maryanov, S. Karianskyi // Student International Scientific Conference Batumi Navigation Teaching University, Batumi, Georgia, 17.05.2022.

Of the scientific works published in co-authorship, the author personally owns:

[1], [3] – improvement of the ship's storage and circulation system of drilling suspension, conducting experimental research, processing and analysis of experimental results, development of recommendations for the implementation of research results;

[8] – setting up experimental equipment, conducting experimental research and processing their results;

[11, 17] – development of an algorithm for conducting experimental research, improving the ship's storage and circulation of drilling fluid, conducting experimental research and processing their results.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК ПРИЙНЯТИХ СКОРОЧЕНЬ	19
ВСТУП	20
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ З ПРОБЛЕМИ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ФУНКЦІОНАЛЬНИХ ХАРАКТЕРИСТИК БУРИЛЬНИХ СУСПЕНЗІЙ ПІД ЧАС ЇХ ТРАНСПОРТУВАННЯ СУДНАМИ ТИПУ PSV	29
1.1. Аналіз основних характеристик та особливостей суден типу Platform Supply Vessels	29
1.2. Аналіз особливостей енергетичної установки суден типу Platform Supply Vessels	38
1.3. Аналіз комплектації та функціонування суднової системи транспортування та зберігання бурильної суспензії	41
1.4. Аналіз функціональних характеристик бурильних суспензій, що транспортуються суднами типу Platform Supply Vessels	48
1.5. Висновки за розділом 1	54
Розділ 2. ЗАГАЛЬНА МЕТОДИКА ДИСЕРТАЦІЙНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ	56
2.1. Вибір теми наукового дослідження	56
2.2. Обґрунтування мети і завдань дисертаційного дослідження	64
2.3. Системний підхід до проведення наукового дослідження	66
2.4. Організація та забезпечення експериментальних досліджень	70
2.5. Висновки за розділом 2	75
Розділ 3. ДОСЛІДЖЕННЯ ФУНКЦІОНАЛЬНИХ ХАРАКТЕРИСТИК БУРИЛЬНИХ СУСПЕНЗІЙ, ЯК ДИСПЕРСНИХ СИСТЕМ	76
3.1. Загальна характеристика бурильних суспензій як дисперсних систем	76

3.1.1. Стійкість бурильних суспензій як дисперсних систем	78
3.1.2. Стабілізація дисперсних систем	80
3.2. Аналіз функціональних характеристик бурильних суспензій як дисперсних систем	81
3.3. Аналіз стійкості та коагуляції бурильних суспензій як дисперсних систем	88
3.3.1. Загальні питання стійкості та коагуляції дисперсних систем	88
3.3.2. Аналіз процесів коагуляції, що відбуваються в бурильних суспензіях	89
3.3.2.1. Коагуляція для статичного стану дисперсної системи	91
3.3.2.2. Коагуляція під час ламінарного руху дисперсної системи	94
3.3.2.3. Коагуляція під час турбулентного руху дисперсної системи	96
3.3.3. Аналіз стійкості бурильних суспензій як дисперсних систем	100
3.3.4. Кінетика коагуляції	103
3.3.5. Теорія агрегативної стійкості дисперсних систем	108
3.4. Дослідження латентної зміни реологічних характеристик бурильних суспензій в умовах їх збереження та транспортування морськими спеціалізованими суднами	111
3.4.1. Технологія і послідовність виконання експериментів	111
3.4.2. Метрологічне забезпечення досліджень	113
3.4.3. Результати досліджень	114
3.5. Висновки за розділом 3	130
Розділ 4. РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЇ, ЩО ЗАБЕЗПЕЧУЄ ПІДТРИМКУ РЕОЛОГІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК БУРИЛЬНИХ СУСПЕНЗІЙ ПІД ЧАС ЇХ ЗБЕРЕЖЕННЯ ТА ТРАНСПОРТУВАННЯ МОРСЬКИМИ СУДНАМИ ТИПУ PSV	132
4.1. Аналіз способів підтримання та відновлення реологічних характеристик бурильних суспензій під час їх транспортування суднами типу PSV	132

4.2. Застосування додаткової циркуляції бурильної суспензії для підтримання її реологічних характеристик	135
4.2.1. Розробка технології забезпечення додаткової циркуляції бурильної суспензії під час її транспортування суднами типу PSV	137
4.2.2. Результати досліджень, виконаних під час перевезення бурильної суспензії на суднах типу PSV	138
4.3. Підтримання реологічних характеристик бурильної суспензії шляхом комплексного впливу на її структурні компоненти	146
4.3.1. Технологія і послідовність виконання експериментів	146
4.3.2. Результати досліджень	149
4.4. Визначення оптимального варіанту встановлення додаткового обладнання під час удосконалення суднової системи збереження та циркуляції бурильної суспензії	163
4.5. Висновки за розділом 4	168
Розділ 5. УДОСКОНАЛЕННЯ СИСТЕМИ ЗБЕРІГАННЯ ТА ЦИРКУЛЯЦІЇ БУРИЛЬНОЇ СУСПЕНЗІЇ НА СУДНАХ ТИПУ PSV	171
5.1. Управління реологічними характеристиками бурильної суспензії під час її зберігання та циркуляції у вантажних танках судна типу PSV..	171
5.2. Автоматичне підтримання функціональних характеристик бурильної суспензії під час її транспортування суднами типу PSV	180
5.3. Аналіз енергетичної ефективності систем зберігання та циркуляції бурильної суспензії суден типу PSV	191
5.4. Висновки за розділом 5	196
ВИСНОВКИ	199
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	206
ДОДАТОК	239

ПЕРЕЛІК ПРИЙНЯТИХ СКОРОЧЕНЬ

БС	–	бурильна суспензія
ВМС	–	високомолекулярні суспензії
ГД	–	головний двигун
ГКР	–	гвинт крок якого регулюється
ГФК	–	гвинт фіксованого кроку
ДВЗ	–	двигун внутрішнього згоряння
ДГ	–	дизель-генератор
ДЛФО	–	теорія Дерягіна-Ландау-Фервея-Овербека
НДП	–	нафтовидобувна платформа
НЗБУ	–	напівзанурювальна бурова установка
ПАВ	–	поверхнево-активні речовини
СБП	–	стаціонарна бурова платформа
СЕУ	–	суднова енергетична установка
СПБУ	–	самопідйомна бурова платформа
СПК	–	судновий пропульсивний комплекс
АНТС	–	Anchor Handling Tug Supply Vessel
DP	–	Dynamic Positioning
MPSV	–	Multi Platform Supply Vessel
MSV	–	Multi Support Vessels
PSV	–	Platform Supply Vessel

ВСТУП

Актуальність теми. Морський і внутрішній водний транспорт містить у своєму складі судна різного призначення та водотоннажності. Перевезення, які виконуються суднами морського транспорту, не обмежуються насипними, наливними та об'ємними вантажами. Поруч з суднами типу General Cargo, Bulk Carrier, Oil Product / Crude Oil / Chemical Tanker, Container Ship, що призначені для перевезення генеральних, насипних, наливних вантажів та контейнерів, а також круїзними суднами, що забезпечують відпочинок пасажирів, існує великий клас спеціалізованих морських суден, які виконують роботи з поглиблення та очищення фарватерів, проведення морських електричних кабелів, установок та обробки якорів, постачанню морських нафтових платформ. Дані типи суден відрізняються підвищеною маневреністю, високою енергоозброєністю, а також містять у своєму складі ряд спеціальних, характерних лише їм, систем. Такою системою (для суден типу PSV – Platform Supply Vessel) є система транспортування бурильної суспензії (БС), яка згодом перекачується на нафтовидобувну платформу (НВП) та використовується для виконання робіт з буріння морського шельфу.

БС являє собою складну багатокомпонентну дисперсну систему дисперсним середовищем, якої є мастильний матеріал нафтового походження, а як дисперсна фаза використовуються різні органічні та неорганічні сполуки, питома маса, яких перевищує питому масу мастильного матеріалу. Залежно від виду та кількості цих з'єднань БС мають різні реологічні характеристики (насамперед густину, в'язкість, опір зсуву, плинність). Під час транспортування БС у зв'язку з дією гравітаційних сил на органічні та неорганічні з'єднання відбувається латентна зміна їхньої дисперсності за обсягом суспензії. Це призводить до розшарування БС та

виникнення стратифікації її густини за глибиною вантажного танку, а також до утворення осаду на дні вантажних танків, в яких вона транспортується. При цьому можливі ситуації, коли кількість осаду з високою густиною не дає можливості для перекачування БС по трубопроводах системи та її викачування на НВП. Видалення осаду ручним або механічним способом належить до категорії невластивих робіт для суднового екіпажу. Їхнє виконання пов'язано зі збільшенням ходового часу судна, тому призводить до втрати теплової та механічної енергії, таким чином збільшує фінансові витрати та знижує економічні показники роботи PSV.

Отже, підтримання експлуатаційних характеристик бурильної суспензії під час її транспортування морськими суднами типу PSV є **актуальним завданням, розв'язання якого наразі не існує.**

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Робота виконувалася відповідно до положень Транспортної стратегії України на період до 2020 року (розп. КМУ 20.10.10 р. № 2174); положень Транспортної стратегії України на період до 2030 року (розп. КМУ 30.03.18 р. № 430-р); а також у рамках наступних держбюджетних науково-дослідних робіт Національного університету «Одеська морська академія»: «Розвиток систем і методів удосконалення технічної експлуатації суднових енергетичних установок на підставі сучасних інформаційних технологій» № ДР 0110U005910 (2017–2019 рр.), «Прогнозування експлуатаційного технічного стану суднової пропульсивної установки на підставі контролю її вібраційно-коливальних характеристик» № ДР 0119U001654 (2018–2021 рр.), у яких автор дисертації брав участь під час виконання окремих розділів.

Мета дослідження. Метою дослідження є підтримка функціональних характеристик бурильних суспензій під час їх транспортування суднами типу PSV.

Основною науковою гіпотезою дослідження є теза, що підтримка функціональних характеристик бурильних суспензій під час їхнього транспортування суднами типу PSV забезпечується удосконаленням системи

зберігання та циркуляції бурильної суспензії шляхом керованого впливу на густину та седиментаційну стійкість бурильної суспензії

Головне завдання наукового дослідження полягає в удосконаленні системи зберігання та циркуляції бурильної суспензії під час її транспортування на суднах типу PSV та визначення способу забезпечення її функціональних характеристик.

Для розв'язання головного завдання дослідження вирішені наступні **допоміжні завдання**:

1) визначення діапазону латентної зміни реологічних характеристик бурильної суспензії під час її збереження та транспортування морськими спеціалізованими суднами типу PSV;

2) визначення кількісного та якісного критерію оцінки зміни реологічних характеристик бурильної суспензії під час її транспортування суднами типу PSV;

3) визначення впливу додаткової примусової Х-подібної циркуляції бурильної суспензії на її реологічні характеристики;

4) визначення схеми встановлення додаткового обладнання, за якою забезпечуються мінімальні гідравлічні та енергетичні втрати в системі зберігання та циркуляції бурильної суспензії.

Об'єкт дослідження – процес транспортування бурильної суспензії суднами класу Platform Supply Vessels.

Предмет дослідження – процес керування реологічними характеристиками бурильної суспензії.

Методи дослідження:

- дедукції (під час здійснення інформаційного пошуку);
- системного аналізу (під час розробки методології наукового дослідження, визначення мети та завдань дослідження, а також під час розробки технологічної карти дослідження);

- математичного та фізичного моделювання (під час розробки моделі об'єкта дослідження та визначенні впливу структурних компонентів та умов транспортування БС на її реологічні характеристики);

- статистичної обробки даних (під час обробки результатів експериментів).

Наукова новизна роботи полягає у тому, що підтримання реологічних характеристик бурильної суспензії під час її транспортування суднами типу PSV забезпечується удосконаленням системи зберігання та циркуляції бурильної суспензії, яке реалізує додаткову примусову Х-подібну циркуляцію бурильної суспензії з одночасною подачею стисненого повітря в нижню частину вантажних танків. При цьому найменші втрати енергії на забезпечення цих процесів досягаються за умови підтримання седиментаційної стійкості бурильної суспензії в діапазоні 2...7 %.

У результаті дослідження вперше:

- встановлено діапазон латентної зміни густини бурильної суспензії під час її транспортування на суднах типу PSV, який у верхній частині вантажного танку складає 7,85...22,45 % та зумовлює полегшення бурильної суспензії, в нижній частині танку – 10,94...30,76 % та зумовлює обважнювання бурильної суспензії;

- запропоновано як кількісний критерій оцінки зміни реологічних характеристик бурильної суспензій під час її транспортування суднами типу PSV сприймати її густину, як якісну – седиментаційну стійкість, кількісну оцінку цих показників визначати площею під залежністю $\rho=f(t)$, $\Delta\rho=f(t)$, де ρ , $\Delta\rho$, t – густина, седиментаційна стійкість, час транспортування бурильної суспензії;

- доведена доцільність використання додаткової примусової Х-подібної циркуляції бурильної суспензії, яка забезпечує 7-ми кратне підвищення седиментаційної стійкості бурильної суспензії та використання комплексного методу, який полягає в одночасному забезпеченні примусової Х-подібної циркуляції бурильної суспензії та подачею повітря в нижню частину

вантажного танка, що сприяє 13,5-ти кратному підвищенню седиментаційної стійкості бурильної суспензії;

- розроблена схема розташування додаткового мобільного обладнання, що забезпечує зберігання, циркуляцію та перекачування бурильної суспензії з мінімальними гідравлічними та енергетичними втратами, та запропонована технологія перекачування бурильної суспензії на нафтовидобувну платформу з урахуванням особливостей суден типу PSV.

Удосконалено:

- спосіб підтримання седиментаційної стійкості бурильної суспензії, що відрізняється від існуючих встановленням діапазону її автоматичного регулювання;

- критерій оцінювання якості транспортування бурильної суспензії, що, на відміну від існуючих, враховує швидкість зміни її седиментаційної стійкості.

Отримала подальший розвиток:

- методика автоматичного регулювання седиментаційної стійкості бурильної суспензії, що враховує можливість її виконання за допомогою мікроконтролерів;

- методика визначення енергетичної ефективності процесу перекачування бурильної суспензії на нафтовидобувну платформу, яка враховує відносну продуктивність вантажних насосів та час перекачування бурильної суспензії.

Практичне значення отриманих результатів полягає у наступному:

- підтримка експлуатаційних характеристик бурильної суспензії під час її транспортування суднами типу PSV забезпечується автоматичним регулюванням значення седиментаційної стійкості бурильної суспензії у діапазоні 2...7 %;

- технологія забезпечення примусової Х-подібної циркуляції бурильної суспензії, а також комплексного методу, що поєднує примусову Х-подібну циркуляцію бурильної суспензії та подачу стисненого повітря в нижню частину вантажного танку, доцільно використовувати на всіх судах типу

PSV; використання цих технологій можливо поширити на інші типи морських суден з метою керованого впливу на функціональні характеристики важких палив, які на них використовуються, зберігаються та транспортуються.

Результати дисертаційного дослідження впроваджені:

- удосконалена система зберігання та циркуляції БС, що забезпечує додаткову примусову Х-подібну циркуляції БС – на спеціалізованому морському судні типу PSV дедвейтом 4630 тонн, що сприяло підтриманню реологічних характеристик БС під час її 30-ти годинного транспортування та більш ніж 2-кратному (з 7,1 до 3,2 годин) зниженню часу перекачування БС на нафтовидобувну платформу;

- удосконалена система зберігання та циркуляції БС, що забезпечує додаткову примусову Х-подібну циркуляції БС – на спеціалізованому морському судні типу PSV дедвейтом 4545 тонн, що сприяло підтриманню реологічних характеристик БС під час її 56-ти годинного транспортування, 2,0...2,7-кратному підвищенню відносної продуктивності вантажних насосів (зі значень 33...48 до 88...98 %) та більш ніж 2-кратному (з 7,3 до 3,6 годин) зниженню часу перекачування БС на нафтовидобувну платформу;

- удосконалена система зберігання та циркуляції БС, що забезпечує комплексний вплив на БС шляхом Х-подібної циркуляції з одночасною подачею повітря в нижню частину вантажного танку – на спеціалізованому морському судні типу PSV дедвейтом 4410 тонн, що сприяло 1,9...2,7 кратному підвищенню відносної продуктивності вантажних насосів (зі значень 35...52 до 95...97 %) та 2,2-кратному (з 6,9 до 3,1 годин) зниженню часу перекачування БС на нафтовидобувну платформу;

- удосконалена система зберігання та циркуляції БС, що забезпечує комплексний вплив на БС шляхом Х-подібної циркуляції з одночасною подачею повітря в нижню частину вантажного танку та автоматичним регулюванням реологічних характеристик БС – на спеціалізованому морському судні типу PSV дедвейтом 5850 тонн, що сприяло 2,0...2,2 кратному підвищенню відносної продуктивності вантажних насосів

(зі значень 42...48 до 91...95 %) та 2,4-кратному (з 7,3 до 3,1 годин) зниженню часу перекачування БС на нафтовидобувну платформу;

- запропонований спосіб оцінювання якості перебігу процесу транспортування бурильної суспензії, на підставі швидкості зміни її седиментаційної стійкості – на спеціалізованому морському судні типу PSV дедвейтом 4630 тонн, що сприяло скороченню часу налагодження системи автоматичного регулювання реологічних характеристик БС з боку оператора;

- система, що забезпечує подачу повітря в нижню частину вантажного танку – на вантажному судні дедвейтом 37250 тонн, що сприяло попередженню розшарування важкого палива у витратних та відстійних цистернах;

- теоретичне обґрунтування переваг використання комплексного впливу на БС шляхом Х-подібної циркуляції з одночасною подачею повітря в нижню частину вантажного танку та автоматичним регулюванням реологічних характеристик БС – у навчальному процесі Національного університету «Одеська морська академія» під час вивчення дисциплін «Процеси перетворення енергії суднових силових установок», «Безпечне управління та менеджмент ресурсів машинного відділення», «Автоматизація технологічних процесів та виробництв».

Особистий внесок здобувача полягає в наступному: проведення інформаційного пошуку та аналізу літературних джерел; розробка математичної моделі процесів коагуляції та пов'язаних з нею зміною реологічних характеристик БС; переобладнання суднової системи зберігання та циркуляції БС та визначення оптимальних ділянок для встановлення обладнання; проведення експериментальних досліджень з подальшою обробкою та аналізом результатів; розробка рекомендації щодо встановлення, налагодження та вдосконалення технічної експлуатації додаткового обладнання, що забезпечує примусову Х-подібну циркуляцію БС та автоматичне регулювання її реологічних характеристик.

Роботи [13, 54, 95, 172, 179, 180, 181, 182, 221, 225, 227, 228] виконані автором самостійно.

У наукових працях, опублікованих у співавторстві, здобувачеві належать особисто: [170], [175] – удосконалення суднової системи зберігання та циркуляції бурильної суспензії, проведення експериментальних досліджень, обробка та аналіз результатів експерименту, розробка рекомендацій щодо впровадження результатів дослідження; [2] – налагодження експериментального обладнання, проведення експериментальних досліджень та обробка їх результатів; [220, 247] – розробка алгоритму проведення експериментальних досліджень, удосконалення суднової системи зберігання та циркуляції бурильної суспензії, проведення експериментальних досліджень та обробка їхніх результатів.

Апробація результатів роботи. Основні результати досліджень за темою дисертаційної роботи доповідались, обговорювались та були схвалені на ряді міжнародних та Всеукраїнських наукових конференціях, зокрема:

International Conference “Scientific research of the SCO countries: synergy and integration January 25, 2020, Beijing, China;

Міжнародної науково-технічної конференції Національного університету «Одеська морська академія», 18.03.2020-19.03.2020, Одеса, 2020;

XII Міжнародної науково-практичної конференції MINTT-2020 «Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті», 27-29 травня 2020 р., Херсон, Херсонська державна морська академія;

II Міжнародної науково-практичної морської конференції кафедри СЕУ і ТЕ Одеського національного морського університету (MPP&O-2020 –Marine Power Plants and Operation), квітень 2020, Одеса, Одеський національний морський університет;

11-ї Міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні енергетичні установки на транспорті і технології та обладнання для їх обслуговування», 08-10 вересня 2020 р., Херсон, Херсонська державна морська академія;

науково-технічної конференції «Морський та річковий флот : експлуатація і ремонт», 25.03.2021 -26.03.2021, Одеса, Національний університет «Одеська морська академія»;

12-ї Міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні енергетичні установки на транспорті і технології та обладнання для їх обслуговування», 06-08 вересня 2021 р., Херсон, Херсонська державна морська академія;

X Міжнародної науково-технічної конференції «Суднова енергетика: стан та проблеми», 4–5 листопада 2021 р., Миколаїв, Національний університет кораблебудування;

науково-технічної конференції «Морський та річковий флот : експлуатація і ремонт», 24.03.2022 -25.03.2022, Одеса, Національний університет «Одеська морська академія»;

Student International Scientific Conference Batumi Navigation Teaching University, 17.05.2022, Batumi, Georgia.

Публікації. За темою дисертації опубліковано 17 наукових праць, з яких 6 – у наукових фахових виданнях України, що входять до переліку наукових фахових видань України, в яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора наук, кандидата наук та ступеня доктора філософії (4 з яких без співавторів, 2 – у подвійному авторстві); 1 – в іноземному виданні країни ЄС (Австрія); 10 статей апробаційного характеру, в тому числі 2 – в збірках доповідей Міжнародних наукових конференцій, що проводились за межами України.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається з переліку умовних скорочень, вступу, п'яти розділів, висновків, переліку використаних джерел та додатків. Загальний обсяг дисертаційної роботи становить 246 сторінок, зокрема: основний текст 158 сторінок з анотацією на 14 сторінках, перелік використаних джерел із 247 найменувань на 33 сторінках, додаток на 8 сторінках, 53 рисунка, 38 таблиць.

Розділ 1. АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ З ПРОБЛЕМИ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ФУНКЦІОНАЛЬНИХ ХАРАКТЕРИСТИК БУРИЛЬНИХ СУСПЕНЗІЙ ПІД ЧАС ЇХ ТРАНСПОРТУВАННЯ СУДНАМИ ТИПУ PSV

Перший розділ дисертаційного дослідження присвячено інформаційному пошуку наукових досліджень та розробок щодо особливостей експлуатації однієї зі складових морського транспорту – суден типу Platform Supply Vessels та системи зберігання та циркуляції БС, яка є однією з ознак цих суден.

Основні результати розділу 1 висвітлені в джерелах [2], [13], [54], [95].

1.1. Аналіз основних характеристик та особливостей суден типу Platform Supply Vessels

Морський та внутрішній водний транспорт є складовою інфраструктури всіх без винятку країн, що мають доступ до морських шляхів. Його розвиток сприяє визнанню країни у Світі, забезпечує логістичний зв'язок цієї країни з іншими та призводить до надходження до країни, яка ним володіє, значних фінансових коштів [1].

Робота шельфових бурильних установок, а також нафтогазовидобувних платформ на всіх етапах супроводжується використанням флоту різноманітних суден забезпечення – вузькопрофільних та багатоцільових [2].

До них належать:

- судна забезпечення (постачання) платформ (Platform Supply Vessel – PSV);
- буксири-завізники якорів (Anchor Handling Tug Supply Vessel – AHTS);

- буксири, аварійно-рятувальні, пожежні, судна для підводно-технічних робіт, трубоукладачі, кабелеукладачі, напівзанурювальні судна, судна сейсмічної розвідки, танкери-шатли, криголам.

Світовий флот таких суден (так званих суден офшорного флоту) нараховує сьогодні понад 7000 одиниць [3, 4]. Дані високотехнологічні судна значною мірою належать спеціалізованим фірмам США, Норвегії, Сінгапуру [5]. Це судна і вузькопрофільні, і багатофункціональні (Multi Platform Supply Vessel – MPSV), у великому діапазоні розмірів, форм корпусу, архітектурно-конструктивних типів, комплектації, автономності, ступеня автоматизації тощо, пристосовані до робіт у заданому регіоні та відповідають його природно-кліматичним, метеорологічним, гідрографічним, гідрологічним умовам та можливим обмеженням (наприклад, по осадці) [6]. Слід зазначити, що більш віддалено від берега місце роботи об'єктів постачання, тим доцільніше використання суден MPSV з великою водотоннажністю та потужністю суднової енергетичної установки (СЕУ), що зумовлено їхньою більшою надійністю, живучістю та безпекою [7, 8].

До суден офшорного флоту належить тип спеціалізованих суден PSV. Судна даного типу відрізняються носовим розташуванням житлової надбудови та ходової рубки, великою відкритою вантажною палубою, розташованими попарно з кожного борту судна вантажними трюмами [9]. Понад 60 % існуючих та таких, що замовляються, суден постачання припадає на відносно великі судна (дедвейтом понад 4000 тонн). Усе більше стає суден постачання, побудованих спеціально для північних акваторій, тобто таких, що мають льодовий клас (в тому числі «криголам-постачальників») та системи боротьби зі зледенінням [10, 11].

Багатофункціональні судна постачання шельфових бурильних установок та інших шельфових споруд (Multi Support Vessels – MSV), залежно від ступеня універсальності, виконують:

- доставку з берегової бази та назад витратних бурових та технологічних матеріалів (цемент, бентоніт, барит, буровий та соляний розчини, метанол),

запасних частин, інструментів, матеріально-виробничого обладнання, продовольства, прісної питної та технологічної води, палива, обслуговуючого персоналу [12, 13];

- буксирування несамохідних платформ та об'єктів з порту в район дислокації та переміщення їх з місця на місце [14, 15];

- розвезення, укладання й підймання (підрив) якорів, що утримують бурові об'єкти системи їх позиціонування [16, 17];

- роботу бурових платформ, враховуючи аварійну евакуацію персоналу з платформ та рятувальні операції, боротьбу з пожежами, з розливами нафти, водолазну підтримку та виконання підводно-технічних робіт з монтажу, обслуговування та ремонту підводного гирлового обладнання свердловин та трубопроводів [18, 19];

- забезпечення технології «нульового скидання» бурильної установки (вивіз сміття, стічних рідин та бурових відходів) [20, 21].

Основні вимоги до цих суден:

- носове розташування надбудови та машинного відділення, а також за необхідністю, злітно-посадкового майданчика (гвинтодрому) для прийому та заправки гвинтокрила, забезпечення швартування судна кормою;

- при різноманітній номенклатурі витратних матеріалів щодо постачання морських бурових споруд наявність у корпусі судна достатніх за обсягами вантажних приміщень (також спеціалізованих) та відкритої вантажної палуби з посиленими фальшбортом, дерев'яним настилом та конструктивним забезпеченням безпеки підвищених місцевих навантажень (не менше 5 т/м²), призначеної для розміщення значної кількості палубного вантажу та, зокрема, для укладання вантажних одиниць, у тому числі довгомірних труб, якірних ланцюгів, бочкотарів, стандартних контейнерів, генеральних вантажів, небезпечних вантажів тощо, а також установки знімного обладнання (для зручності всіх різновидів робіт відкрита вантажна палуба повинна розташовуватися в корму від носової надбудови) [22, 23];

- забезпечення можливості швартування до суден та об'єктів, що плавають у відкритому морі [24];
- оснащення спеціальними вантажним обладнанням, пристроями та системами для приймання та передачі сухих та рідких вантажів у відкритому морі, зокрема, в умовах розгойданої хитавиці [25];
- оснащення рятувальними пристроями та роз'їзними засобами для порятунку персоналу з аварійних нафтогазових об'єктів та наявність місць для його тимчасового розміщення [26];
- значна автономність за умов великого віддалення від берегових баз [27];
- висока мореплавність судна в будь-яких умовах хитавиці, для цього необхідна спеціальна форма корпусу і високо розташована палуба в носовій частині, за допомогою яких досягається зниження заливання [28];
- підвищений рівень керованості (маневрування та стабілізації системою динамічного позиціонування, а також в умовах обумовлених бальністю хитавиці та швидкості течії та вітру) для забезпечення передачі доставлених вантажів на об'єкт постачання та для утримання судна на місці під час виконання ним водолазних та аварійно-рятувальних робіт [29];
- обладнання системами, пристроями та постачанням для боротьби з пожежами на зовнішніх об'єктах [30];
- наявність запасу потужності СЕУ з метою запобігання значної втрати швидкості ходу через інтенсивну хитавицю, для забезпечення режиму динамічного позиціонування за різних погодних умов і можливості буксирування плавучих бурових платформ, що переміщуються, допустимої до такого транспортування маси (обов'язкова наявність буксирного пристрою з обумовленим тяговим зусиллям) [31];
- оснащення судна ємностями для прийому з бурової установки сміття, забрудненої нафтопродуктами води та стічних рідин, а також танками для нафти, зібраної з поверхні води під час аварії (оснащення судна пристроями

та засобами з ліквідації аварійних розливів нафти) та відходів буріння свердловин (принцип «нульового») скидання» [32];

- для обумовлених умов функціонування – льодовий клас судна та забезпечення засобами боротьби зі зледенінням [33].

Середні значення технологічних запасів, необхідних для буріння свердловин, роботи СЕУ та екіпажу під час обслуговування стаціонарних бурових платформ (СБП), самопідйомних (СПБУ) та напівзанурювальних бурових установок (НЗБУ) наведено у таблиці 1.1.

Таблиця 1.1

Середні значення витратних матеріалів, %, у кількості поповнюваних матеріалів, транспортованих суднами PSV

Тип установок	Сухі компоненти	Буровий розчин	Паливо	Бурова вода	Питна вода	Всього
СБП	10,3	16,8	16,8	45,2	10,9	100
СПБУ	13,1	14,3	21,7	41,2	9,7	100
НЗБУ	10,9	8,8	30,3	42,6	7,4	100

Обсяги та площі вантажного простору (крім вантажної палуби), розмірювання, архітектурно-конструктивний тип та форма самого судна визначаються:

- номенклатурою та кількістю зазначених вище перевезених судном витратних рідких та сипких вантажів (за масою або за обсягом), що розташовуються для забезпечення їхнього збереження переважно в особливих ємностях, які встановлюються в підпалубному просторі, що завантажуються та розвантажуються спеціальними насосами [34];

- кількістю членів екіпажу та чисельністю спеціального персоналу бурових установок, максимально можливою для перевезення на судні PSV [22, 35].

У таблиці 1.2 подано техніко-експлуатаційні характеристики існуючих суден постачання, побудованих у період останніх 2...7 років.

Таблиця 1.2

Техніко-експлуатаційні характеристики сучасних суден PSV, що працюють у районах Мексиканської затоки та Західної Африки.

Рік побудови	2014	2016	2016	2017	2018	2019	2020	2020
Довжина найбільша, $L_{\text{нб}}$, м	94,7	94,5	78,3	91,4	66,2	70,0	87,2	89,1
Ширина, B , м	21,0	18,9	21,0	18,9	16,5	18,3	18,9	19,2
Осадка, T , м	7,0	6,5	5,8	5,9	6,0	4,9	6,1	6,2
Висота борту, H , м	8,5	7,9	6,8	7,3	5,9	6,1	6,8	7,1
Довжина вантажної палуби, $L_{\text{вп}}$, м	70,1	65,2	53,2	60,3	50,3	53,2	67,1	65,0
Відношення $L_{\text{вп}}/L_{\text{нб}}$	0,74	0,69	0,68	0,66	0,76	0,76	0,77	0,73
Коефіцієнт повноти корпусу, δ	0,66	0,79	0,75	0,79	0,78	0,73	0,76	0,77
Водотоннажність, D , тонн	9220	9190	7200	8120	5120	4585	7640	8170
Дедвейт, DW , тонн	5610	6430	4030	5150	3845	3280	5660	5850
Швидкість ходу, v , вузли	12,4	12,1	12,5	12,2	12,5	12,7	12,6	12,8

Закінчення таблиці 1.2

Рік побудови	2014	2016	2016	2017	2018	2019	2020	2020
Число Фруда, $Fr_{\perp}$	0,21	0,21	0,23	0,21	0,22	0,23	0,25	0,25
Автономність плавання, R , миля	12300	12900	7600	12600	8100	9200	9200	11100
Потужність СЕУ, N , кВт	7560	6180	5220	5845	3880	3575	5730	6460
Відношення N/D , кВт/тонн	0,82	0,67	0,73	0,72	0,76	0,78	0,75	0,79
Коефіцієнт використання дедвейту, $\eta_{DW}=DW/D$	0,61	0,70	0,56	0,63	0,75	0,72	0,74	0,72
Маса корисного вантажу, $P_{\text{кв}}$, тонн	3715	4335	3180	3730	3150	2660	4415	4505
Частка корисного вантажу в складі дедвейту, $P_{\text{кв}}/DW$	0,66	0,67	0,79	0,72	0,82	0,81	0,78	0,77

За наведеними у таблиці 1.2 характеристиками суден постачання можна зробити кілька важливих висновків:

- це судна відносно тихохідні (абсолютна швидкість їх лежить в інтервалі 11...12 вузлів, хоча є судна зі швидкостями в діапазоні 14...16 вузлів і навіть більше). Багато які з них, зважаючи на невеликі розміри, за своїм гідродинамічним типом можуть бути віднесені до категорії середньо-швидкісних суден як такі, що мають число Фруда Fr в діапазоні 0,21...0,25;

- енергоозброєність цих суден, що характеризується величиною N/D , має середнє значення ~ 1 кВт/т водотоннажності, що значно вище, ніж у традиційних транспортних суден;

- коефіцієнт використання дедвейту у складі повної водотоннажності η_{DW} в середньому знаходиться в інтервалі $0,6 \dots 0,7$, що пояснюється його функціональністю. Це вимагає наявності великої кількості профільного обладнання, через що зростає водотоннажність порожнього судна;

- їх відрізняє велика дальність плавання R , що встановлюється технічним завданням, і відповідні великі запаси палива, що пов'язано з особливостями логістичної підтримки їхньої експлуатації, зокрема, з необхідністю роботи як судно-рятувальник біля бурової платформи та забезпечення великих витрат палива в режимі динамічного позиціонування або під час буксирування таких величезних споруд, як НЗБУ;

- частка корисного вантажу P_{kv}/DW у складі дедвейту DW порівняно з традиційними транспортними суднами відносно незначна і середнє її значення становить $\sim 0,7$, що пов'язано, по-перше, зі специфікою перевезення рідких та сухих вантажів постачання не безпосередньо у трюмах, а у спеціальних ємностях, і, по-друге, з розміщенням генеральних вантажів на вантажній палубі, що зумовлює великі втрати обсягів вантажних трюмів і простору палуби;

- вантажна палуба в ділянках від повної довжини становить в середньому $L_{вп}/L=0,68 \pm 0,04$.

У величину дедвейту DW суден постачання враховують масу названих вантажів і знімного обладнання, запасів палива і мастильних матеріалів для самого судна, екіпажу і спеціального персоналу і його витратного постачання відповідно до призначеної автономності.

Судна постачання відрізняє мале відношення L/B зі значеннями в діапазоні $L/B=4,5 \pm 0,5$, що зумовлено вимогами забезпечення великої поворотності та наявності якомога більшої площі $S_{вп}$ та ширини B верхньої вантажної палуби. Цьому сприяють і відносно великі значення відношення

$B/T=3,0\pm0,3$, що дозволяють гарантувати достатність поперечної стійкості при тому, що значна частина вантажу приймається на верхню палубу, але особливо проблемною ситуація з стійкістю стає в процесі виконання на судні вантажних операцій при одночасній підтримці динамічного позиціонування судна типу PSV [6, 36].

Відповідно до Міжнародного кодексу стійкості суден у непошкодженому стані 2008 року (Кодекс ОЧНС) (рез. MSC.267(85)) з поправками, судну постачання дається таке визначення: «Судно постачання морських установок означає судно, яке, в основному, зайняте у перевезенні предметів постачання, матеріалів та обладнання для морських установок та в конструкцію якого входять надбудови житлових приміщень та містка в носовій частині, а також відкрита вантажна палуба в кормовій частині для обробки вантажів у морі» [37].

Враховуючи практично необмежені умови експлуатації суден типу PSV, високі вимоги до їхньої всепогодності, штормової мореплавності, безпеки (як їх власної, так і відносно об'єктів, що ними обслуговуються), зрозуміло, чому цим суднам приділяється така пильна увага з боку контролюючих органів на рівні Міжнародної морської організації ІМО, Регістру судноплавства України, Держгідрографії України, Регістрів інших країн. У нормативних документах цих органів забезпечення безпечної експлуатації суден типу PSV виділяється окремими параграфами або спеціальними директивами. До таких документів зокрема належать:

- спеціальна резолюція Комітету Безпеки ІМО MSC.235(82) у вигляді «Посібника з проектування та конструкції суден постачання морських установок» [38];
- «Кодекс безпечної практики перевезення вантажів та людей суднами постачання морських установок» (Кодекс СПМУ) [39];
- особливі розділи стосовно таких суден у «Міжнародному кодексі стійкості суден у непошкодженому стані» (Кодекс ОЧНС 2008 р.) [37].

Названими документами, а також Правилами Регістру судноплавства регламентуються, зокрема, параметри та характеристики стійкості, вид їх діаграм стійкості, особливо під час перевезення на палубі штабелів труб в умовах зледеніння. Крім стійкості, особливо регламентуються вимоги до непотоплюваності, конструкції корпусу і, зокрема, до товщини і підкріплень вантажної палуби, влаштування привальних брусів, зливних шпигатів для осушення палуби, яка оснащується міцним суцільним фальшбортом. Регламентуються також мінімально допустима висота надводного борту в кормі $>0,005L$ (де L – максимальна довжина судна), умови перевезення людей, небезпечних, сухих та рідких вантажів (особливо палива), вимоги до способів та засобів вантажних операцій, що проводяться у відкритому морі [40].

1.2. Аналіз особливостей енергетичної установки суден типу Platform Supply Vessels

СЕУ суден офшорного флоту не поділяється на основну (яка передає енергію на гвинт та забезпечує рух судна) та допоміжну (яка забезпечує електроенергетичні потреби судна). Двигуни внутрішнього згоряння (ДВЗ), що встановлюються на цих суднах, передають свою потужність як на рушій (один або кілька гвинтів, крок яких регулюється, або гвинтові колонки), так і на допоміжне енергетичне та технологічне обладнання [41, 42].

Враховуючи прагнення мінімізувати обсяги машинного відділення на суднах PSV, їхня енергетична установка складається з чотиритактних високофорсованих ДВЗ (дуже часто V-подібних). Це збільшує витрату палива (як питому, так і добову), але розширює діапазон використання потужності дизеля [43, 44]. Порівняльна характеристика різних морських суден наведено у таблиці 1.3.

Таблиця 1.3

Порівняльні характеристики морських суден

Тип судна	Водотоннажність, D , тонн	Тип гвинтів	Потужність СЕУ, N_e , кВт	Питома потужність, N_e/D , кВт/тонн
General Cargo	5000...10000	ГКР	2500...4500	0,45...0,5
	12000...40000	ГФК	6500...16000	0,35...0,40
Ro-Ro	5000...10000	ГКР	2500...5000	0,45...0,50
	12000...50000	ГФК	5500...15000	0,3...0,45
Bulk Carrier	25000...100000	ГФК	8000...30000	0,3...0,35
Oil Product / Crude Oil / Chemical Tanker	25000...300000	ГФК	10000...30000	0,25...0,45
Container Ship	5000...10000	ГКР	25000...50000	0,5...0,65
	12000...150000	ГФК	60000...85000	0,5...0,55
PSV	3000...10000	ГКР	4000...75000	0,67...0,82

У таблиці 1.3: ГКР – гвинт, крок якого регулюється; ГФК – гвинт фіксованого кроку

Більшість суден постачання мають електрорух (пропульсивні установки з електричною передачею енергії Z-Drive, L-Drive та Azipod). Це доцільно через необхідність забезпечення безлічі режимів використання потужності головного двигуна (ГД), які постійно змінюються, а також через наявність дуже енергоємних додаткових споживачів енергії у вигляді підрулюючих пристроїв та/або гвинторульових колонок, що функціонують від електроприводу як засобу забезпечення динамічного позиціонування (Dynamic positioning – DP) [45, 46]. Розміщення машинного відділення суден такого типу – у носовій половині судна. При цьому звільняється кормова

частина судна під вантажні відсіки та забезпечуються всі роботи з прямого призначення судна [47, 48].

Особливістю енергетичної установки суден типу PSV є також наявність у цих суднах значних запасів потужності ГД (таблиця 1.4). Це пов'язано з використанням засобів DP на ходовому режимі, таких як пристрій, що підрулює, і/або гвинторульова колонка, а також потребою в запобіганні втрат швидкості ходу під час хитамиці й вітрі, щоб гарантувати безперебійність поставок витратних матеріалів на об'єкти постачання [49, 50].

Таблиця 1.4

Потужність суднових енергетичних установок та запас потужності у суден
постачання

Дедвейт судно типа PSV, тонн	Потужність ГД СЕУ, кВт	Необхідна потужність на забезпечення динамічного позиціонування судна, кВт	Запас потужності на забезпечення <i>DP</i> , %
3280	3575	1250	0,35
3845	3880	1240	0,32
4030	5220	2200	0,42
5150	5845	2225	0,38
5610	7560	2800	0,37
5660	5730	2000	0,35
5850	6460	2585	0,40
6430	6180	2040	0,33

1.3. Аналіз комплектації та функціонування суднової системи зберігання та циркуляції бурильної суспензії

Робота суднового пропульсивного комплексу (СПК), до складу якого долучають головну енергетичну установку, корпус судна та рушій, неможлива без допоміжного обладнання та суднових систем.

До механічних систем, що забезпечують роботу ГД, допоміжних дизель-генераторів (ДГ) та суднової котельної установки, враховують:

- паливну систему (як правило, важкого та легкого палива і як виняток – одне загальне паливо середньої в'язкості);
- систему змащування (циліндрову та циркуляційну – у разі двотактних дизелів або тільки циркуляційну – у разі чотиритактних);
- систему охолодження (замкнену – прісної води та розімкнену – заборотної);
- систему повітрепостачання та випуску газів [51, 52].

Загальносудовими системами є: баластна, питна води та води для миття, пожежна та ряд інших [53].

Однією зі спеціальних систем, характерних тільки для морських суден типу PSV, є система зберігання та транспортування БС (спеціальної технічної рідини, що доставляється цими суднами на морські бурові платформи) [54, 55]. Схема зберігання та транспортування БС судна типу PSV дедвейтом 4450 тонн наведена на рис. 1.1.

Принцип роботи наведеної системи полягає в наступному. П'ять вантажних танків, розташованих у діаметральній площині судна (рис. 1.1), починаючи з корми – 4, 3, 2 у зворотній нумерації, а також 1-й лівий та 1-й правий вантажний танки, розташований по кожному з бортів судна, з'єднані системою трубопроводів. При цьому відцентровими насосами забезпечується всмоктування / нагнітання БС (приймання на борт / видача на нафтовидобувну платформу).

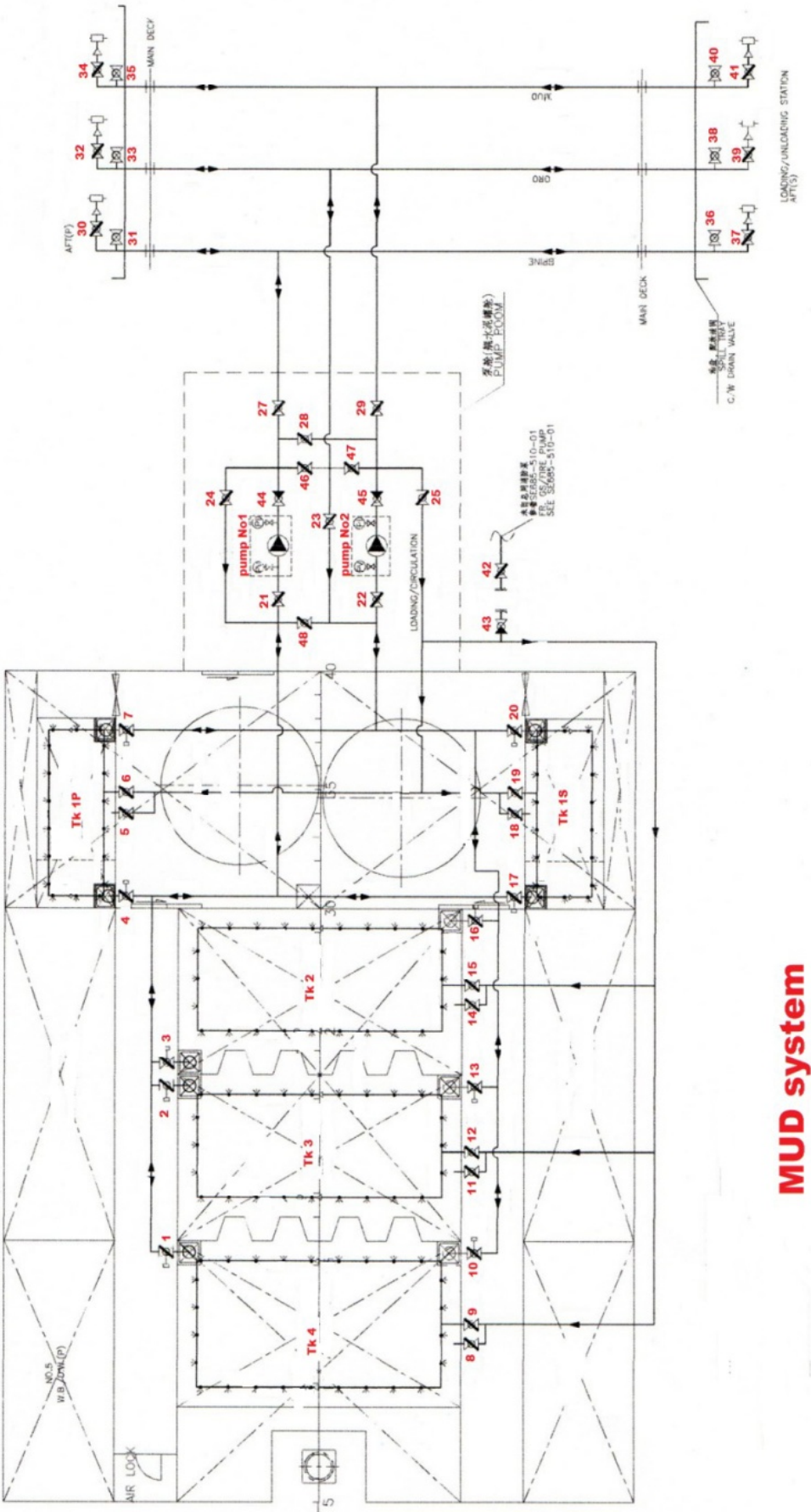


Рис. 1.1.1. Схема зберігання та транспортування БС судна типу PSV дедвейтом 4450 тонн

У разі необхідності видачі БС (наприклад, вантажного танка 4) система функціонує таким чином. Відкриваються клапани: відсічний всмоктувального трубопроводу 1; 21 на всмоктуванні вантажного насоса № 1; нагнітання 44 після вантажного насоса № 1; 27 на трубопроводі нагнітання (вихід на верхню палубу); 30 або 37 (залежно від того, з якого борту судна відбувається видача БС). При цьому в закритому положенні повинні бути: клапани всмоктування 2 і 3 (розташовані послідовно); а також клапани 48, 23, 46, 47, 29, 28, 47, 25, 24, які забезпечують нагнітання. Після контролю положення клапанів проводиться пуск вантажного насоса з постійним моніторингом тиску нагнітання та всмоктування (для стандартних режимів тиск на всмоктуванні становить $-0,04$ МПа, на нагнітанні $0,4...0,6$ МПа – в залежності від висоти нафтовидобувної платформи (НВП), на яку відбувається видача БС). При цьому подача насоса становить 65 м^3 . Регулювання тиску БС забезпечується байпасним клапаном 24.

Робота системи в режимі циркуляції відбувається у наступній послідовності (наприклад, для вантажного танка 2). У відкритому положенні повинні бути наступні клапани: відсічний 2 на всмоктуванні з вантажного танку; 21 на всмоктуванні перед вантажним насосом № 1; 44 на нагнітанні після вантажного насоса № 1; 46, 47, 25, 12 – для повернення БС у вантажний танк. При цьому БС надходить у танк через кільцевий трубопровід, розташований на його периметрі. Після контролю положення клапанів виконується пуск вантажного насоса та моніторинг тиску всмоктування / нагнітання (за допомогою байпасного клапана 24). Для стандартних режимів тиск на всмоктуванні становить $-0,01$ МПа, на нагнітанні $0,2...0,3$ МПа.

У даній комплектації системи утворюється замкнутий контур, який забезпечує циркуляцію БС підтримки її у необхідному стані відповідно до рекомендацій виробника.

Роботи системи в режимі прийому у вантажні танки з берега / судна (наприклад, для вантажного танка № 3). Вмикається приймальний шланг надходження БС з берега / судна до сполучної муфти з клапанами 32, 39 (з

правого або лівого борту відповідно). Послідовно відкриваються клапани 32, 39 і далі 47, 25, 11. Це забезпечує прийом БС з берега / судна у вантажний танк. За необхідності можливе відкриття клапана 12. При цьому рух БС здійснюватиметься через кільцевий трубопровід усередині вантажного танка. Це забезпечує додаткове перемішування БС обсягом вантажного танка.

У системі зберігання та транспортування БС використовуються відцентрові насоси з максимальною продуктивністю $Q=150 \text{ м}^3/\text{год}$, напором $H=35 \text{ м}$, які мають привід від асинхронного трифазного електродвигуна (напруга 440 В, частота струму 60 Гц, потужність 70 кВт, частота обертання 1750 об/хв).

Існують схеми зберігання БС, що знаходиться безпосередньо на НВП (рис. 1.2-1.4).

Їхні експлуатаційні властивості полягають в наступному.

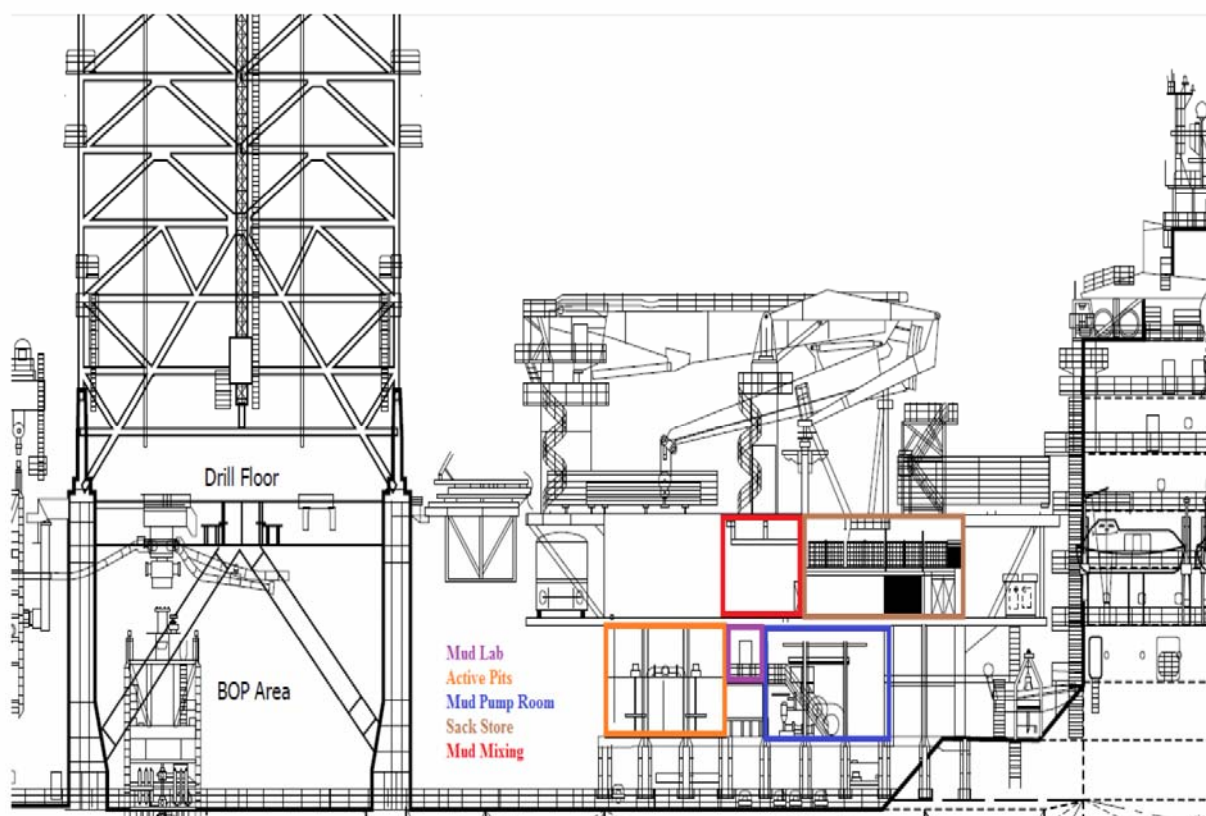


Рис. 1.2. Схема комплектації системи зберігання та транспортування бурильної суспензії на НВП

На рис. 1.2 надана схема комплектації системи зберігання та транспортування бурильної суспензії на НВП.

Система розташована у зоні зберігання. Первинна функція системи змішування призначена для приготування суспензії, її зберігання та транспортування до зони бурильних операцій. До її складу також входить система подачі води для буріння, яка забезпечує накопичення води для подальшого приготування БС. Бурильна вода відповідає якості звичайної води, але не підходить для споживання судновим екіпажем. Судна типу PSV поставляють таку воду на бурові платформи. Бурильна вода розташована в ємностях для технічної води на буровій платформі. Перед змішуванням з БС визначається необхідний обсяг води, що надходить системою в ємності змішування. Міксер БС змішує воду з хімічними реагентами відповідно до вимог бурильної партії. Система бурильної води включає дві ємності об'ємом, розташовані з правого і лівого бортів бурової платформи.

На рис. 1.3 надана схема розташування компонентів системи зберігання та циркуляції БС на НВП

Конфігурація системи приготування БС організована таким чином, щоб БС не змішувалася з іншими рідинами та була безпечно транспортована. Система циркуляції БС повинна мати систему трубопроводів скидання зворотного потоку в ємність для циркуляції. Так само, у разі непередбаченого блокування циркуляції в системі, дана система обладнана дозаторами для додавання до БС хімічних компонентів для деблокування седиментованої БС на ділянках трубопроводів.

Схема розташування компонентів системи зберігання та циркуляції БС на НВП надана на рис. 1.4. До її складу входить наступне допоміжне обладнання та компоненти:

- стисне повітря на буровій платформі призначене для транспортування сухого вантажу в розширювальні ємності. Повітря подається з машинного відділення стисненим компресорами. Дистанційно керовані клапани

функціонують за рахунок повітря низького тиску, які, у свою чергу, керуються оператором з пульта управління;

- насоси змішування БС – найважливіше обладнання для приготування суспензії бурильної. розширювальні ємності – оператор заповнює ємності певним компонентом із ємності зберігання;

- ємності, що знаходяться на судні, мають великий обсяг для зберігання БС. Перший розширювальний бак призначений для зберігання бариту, доки другий заповнений бентонітом. Заповнювач осередків розташований на дні розширювального бака. Перевага в даному розташуванні полягає в тому, що верхня частина бункера природним чином контролює дозування хімічного складу, що перешкоджає блокуванню системи під час змішування БС.

Існують й інші схеми комплектації системи зберігання та транспортування БС, одна з них наведена на рис. 1.5.

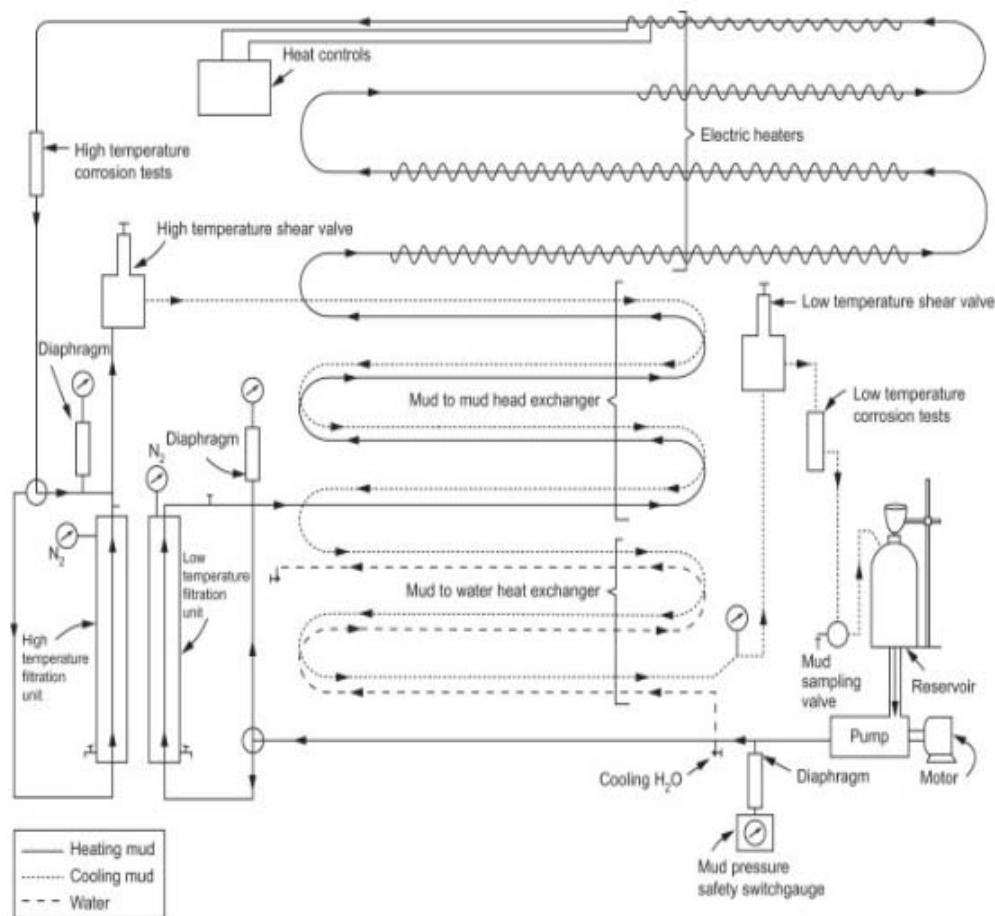


Рис. 1.5. Схема внутрішньої циркуляції БС на НВП

1.4. Аналіз функціональних характеристик бурильних суспензій, що транспортуються суднами типу Platform Supply Vessels

Виконання бурових робіт здійснюється руйнуванням зони буріння. При цьому в свердловині накопичується шлам, який необхідно постійно видаляти та виносити із зони буріння [56, 57]. Видалення продуктів руйнування під час буріння нафтовидобувних морських свердловин може здійснюватися декількома способами, основними з яких є гідравлічний, пневматичний, комбінований (гідропневматичний або пневмогідравлічний) [58, 59]. На морських НВП використовують гідравлічний спосіб, при якому продукти руйнування видаляються із зони буріння та транспортуються на поверхню потоком БС, що рухається в системі буріння з певною швидкістю (рис. 1.6).

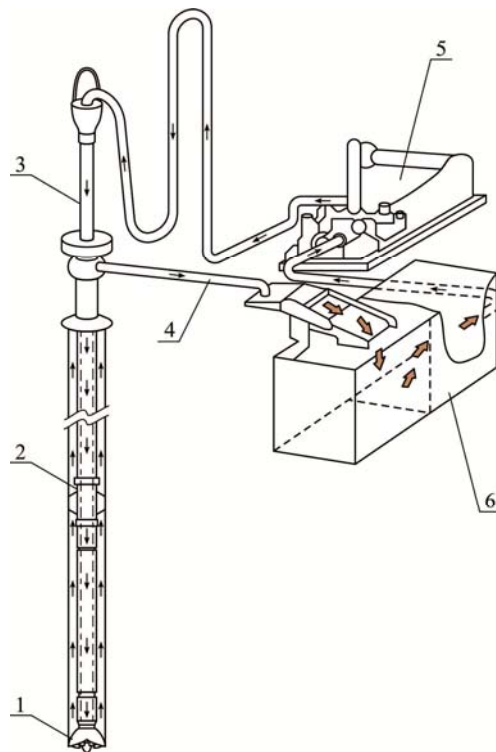


Рис. 1.6. Технологічна схема використання бурильної суспензії:

1 – бур, 2 – бурильна труба, 3 – поворотна труба, 4 – магістраль бурильної суспензії, 5 – насос подачі бурильної суспензії, 6 – танк бурильної суспензії

Отже, промивання свердловин при існуючих в даний час способах буріння є технологічно необхідною, що визначає призначення БС не тільки як мастильного матеріалу для бура (позиція 1 на рис. 1.6), але і як засобів очищення зони буріння від шламу і винесення його на поверхню [60, 61]. Необхідною умовою ефективного винесення шламу із зони буріння є наявність циркуляції БС, що здійснюється насосом подачі БС 7, за контуром танк бурильної суспензії 6 – поворотна труба 3 – бурильна труба 2 – магістраль бурильної суспензії 4 (рис. 1.6).

Крім основного призначення, БС виконують цілу низку цільових функцій у зв'язку зі специфікою бурової технології, активною взаємодією їх з глибинним та поверхневим обладнанням циркуляційних систем, з різними за складом та властивостями ґрунтовими породами [62-64]. Усі функції БС можна поділити на три групи:

- гідростатичні функції:

- 1) створення протитиску на стінки ствола;
- 2) надання протитиску на пластові флюїди;
- 3) утримання дисперсної фази та шламу у зваженому стані за відсутності циркуляції [65, 66];

- гідродинамічні функції:

- 1) очищення зони буріння;
- 2) очищення стовбура та винесення шламу на поверхню;
- 3) охолодження бурового обладнання і поверхонь, що труться [67, 68];

- фізико-хімічні функції:

- 1) мащення поверхонь тертя;
- 2) захист бурового обладнання та інструменту від корозії;
- 3) покращення буримості морського шельфу (ефект Ребіндера, підвищення зносостійкості бурового обладнання тощо.) [69, 70].

Перелічені функції БС нерівнозначні, необхідність і повнота реалізації більшості їх пов'язана з конкретними цілями та умовами буріння свердловин, а також з технологією їх транспортування.

Спільними є вимоги екологічної та промислової безпеки, технологічності та економічності БС. Фундаментальними є вимоги охорони праці та екологічної безпеки БС [71, 72]. Для БС, що використовуються на морських нафтовидобувних платформах, під економічністю БС мається на увазі не тільки доступність і дешевизна її виробництва, а, головним чином, транспортування її з підтримкою всіх функціональних властивостей [73, 74]. Транспортування БС входить в одне із завдань, що покладаються на судна типу PSV [75, 76].

З позицій колоїдної хімії БС є складною багатокомпонентною сумішшю, яка залежно від зовнішніх умов виявляє властивості молекулярного розчину або дисперсної системи [77, 78]. Дисперсним середовищем БС є гідравлічне мастило, яке складається з низькомолекулярних та високомолекулярних сполук. Низькомолекулярні сполуки є переважно парафінові, нафтові та ароматичні вуглеводні [79, 80]. Високомолекулярна частина гідравлічного мастила складається з високомолекулярних парафінових вуглеводнів; моно- та конденсованих нафтових, парафінових, моно- та біциклічних ароматичних вуглеводнів; смол та асфальтенів. Як дисперсну фазу в БС вводяться металоорганічні (лужні, лужноземельні, перехідні), кремнійорганічні та фторорганічні сполуки. Порівняно з гідравлічним мастилом ці сполуки характеризуються у кілька разів більшою молекулярною масою, наявністю поверхні розділу фаз між ними та дисперсійним середовищем, високою густиною, малою летючістю та надають дисперсійній системі специфічні властивості [81, 82]. При цьому система набуває:

- 1) структурно-механічну міцність [83, 84];
- 2) нестійкість та здатність до розшарування на фази [85, 86].

Неорганічні низькомолекулярні реагенти, що входять до складу БС, поділяють на чотири підгрупи:

1) лужні: гідроокису калію – KOH, натрію – NaOH та кальцію – Ca(OH)₂; карбонати натрію – Na₂CO₃ та калію – K₂CO₃, гідрокарбонат натрію – NaHCO₃;

2) природні водорозчинні та практично нерозчинні солі: галіт – NaCl, сильвін – KCl, бішофіт – MgCl₂·6H₂O, карналіт – KMgCl₃·6H₂O, ангідрит, крейда, вапняк, доломіт, барит та інші;

3) іонні інгібітори – реагенти, що постачають у БС катіони K, Ca²⁺, Al³⁺, Si⁴⁺, Cr⁶⁺; хлористий калій; кальцій, натрій та алюміній, що містять реагенти K₂SO₄·Al₂(SO₄)₃, Al₂(SO₄)₃, NaAlO₂, Na₂SiO₃, тощо;

4) полімероподібні неорганічні реагенти. До них належать конденсовані фосфати (поліфосфати); триполіфосфат натрію Na₅P₃O₁₀, гексаметафосфат натрію (NaPO₃)₆ та пірофосфат натрію Na₄P₂O₇ [87].

Обважнювання БС викликано необхідністю створення протитиску на стінки свердловини. Особливо актуальним є забезпечення цього ефекту саме для морських нафтових розробок, у яких на свердловину створюється додатковий гідростатичний тиск, що зростає зі збільшенням глибини шельфу та глибини безпосередньо свердловини. Деякі характерні дані по інертним обважнювачам, що використовуються в буровій технології, наведені в таблиці 1.5, а в таблиці 1.6 наведена характеристика водорозчинних солей.

Таблиця 1.5

Характеристика обважнювачів, що вводяться до бурильної суспензії

Обважнювач	Формула	Густина, кг/м ³
Барит	BaSO ₄	4300...4700
Гематит	Fe ₂ O ₃	5000...5300
Магнетит	Fe ₃ O ₄	4900...5200
Сидерит	FeCO ₃	3800...3900
Доломіт	CaMg(CO ₃) ₂	2000...2900
Галеніт	PbS	7400...7600

Таблиця 1.6

Густина розчинів солей, що вводяться до бурильної суспензії

Сіль	Густина, кг/м ³	Сіль	Густина, кг/м ³
NH ₄ Cl	1070	CaBr ₂	1820
KCl	1160	ZnBr ₂	2300
NaCl	1180	NaCl+Na ₂ CO ₃	1200...1270
MgCl ₂	1300	NaCl+CaCl ₂	1200...1400
KBr	1370	NaCl+NaBr	1200...1510
CaCl ₂	1400	CaCl ₂ +CaBr ₂	1400...1810
NaBr	1510	CaBr ₂ +NaBr	1800...2300
K ₂ CO ₃	1550	CaBr ₂ +ZnBr ₂	1800...2300

Під час виконання бурових робіт на морських родовищах нафти використовуються БС на вуглеводневій основі. У них дисперсійним середовищем є вуглеводнева рідина, представлена переважно нафтою, продуктами її переробки (дизельним паливом, моторним чи гідравлічним мастилом) та його сумішами [88].

Нафтова основа (нафта, паливо, мастило) повинна мати певне співвідношення ароматичних, нафтиєвих та парафінових вуглеводнів для того, щоб забезпечити необхідну дисперсність асфальтенів. Асфальтени добре розчиняються в ароматичних вуглеводнях з утворенням істинних розчинів, але зовсім не розчиняються і навіть не набухають у парафінових та нафтиєвих вуглеводнях. Для забезпечення низької фільтрації необхідно, щоб розміри частинок асфальтенів відповідали розмірам пор порід, що розбурюються, а на стінках свердловини відкладалася щільна непроникна кірка [89].

Для седиментаційної стійкості та розвитку структурно-механічних властивостей у БС на вуглеводневій основі вводяться реагенти – стабілізатори та активні наповнювачі. Стабілізаторами є мила лужних та

лужноземельних металів, катіонактивні та аніонактивні поверхнево-активні речовини (ПАВ) тощо [90].

Як наповнювачі для регулювання структурно-механічних властивостей розчинів на вуглеводневій основі використовуються олеофільні глини (органобентоніти) або гашене вапно.

Регулювання міцності структури та в'язкості в БС на вуглеводневій основі досягається відповідним підбором вуглеводневого складу дисперсійного середовища, варіюванням вмісту окислювача та наповнювачів.

Густина звичайних БС на вуглеводневій основі становить близько 900 кг/м^3 . За допомогою обважнювачів можна піднімати її до 2500 кг/м^3 , збільшуючи таким чином структурно-механічну міцність.

Структурно-механічна міцність системи підвищує мастильну здатність БС. Особливо актуальним набуття даної властивості є при контакті бурового інструменту з ґрунтом та під час перекачування БС усередині суднової системи. У першому випадку знижуються температурні та механічні напруги в зоні контакту, у другому – гідравлічні опори в насосах, трубопроводах та арматурі [91].

Нестійкість БС та здатність до розшарування на фази, як правило, характерно при її високому напруцюванні, тривалому знаходженні в статичному стані, а також за порушення умов експлуатації [92, 93].

Підтримка функціональних характеристик БС забезпечує надійне функціонування обладнання та безперервність процесу видобутку нафти. Найчастіше вивчення цих питань відбувається для континентальних родовищ, умов, які враховують специфіку транспортування і передачі БС на морські чи океанські бурові платформи [94, 95].

Порушення умов зберігання та циркуляції БС на судах типу PSV має негативні наслідки та в першу чергу призводить до утворення осаду з важких компонентів, якими вона легована (рис. 1.7).



Рис. 1.7. Утворення осаду з важких компонентів,
якими легована бурильна суспензія

Утворення осаду погіршує характеристики БС, призводить до обов'язкового виконання робіт з поновлення технічного стану системи зберігання та циркуляції БС (особливо у вантажних танках), підвищує тривалість транспортного циклу берегова база постачання – НВП.

1.5. Висновки за розділом 1

Як результат досліджень, що пов'язані з інформаційним пошуком наукових та науково-технічних розробок щодо особливостей експлуатації морських спеціалізованих суден типу PSV, визначимо наступне.

1. На сьогодні велика кількість країн впроваджує проектування, побудову та експлуатацію морських спеціалізованих суден (типу Platform Supply Vessel – PSV), що виконують функції забезпечення нафтовидобувних платформ. Це пов'язано з поступовим виснажуванням континентальних родовищ нафти та необхідністю проведення видобутку вуглеводневих ресурсів з морського або шельфового дна.

2. Судна типу PSV відрізняються від інших суден підвищеною енергетичною озброєністю, великою маневреністю та наявністю характерних лише для них спеціальних судових систем. Однією з цих систем є система зберігання та циркуляції бурильної суспензії, яка транспортується суднами типу PSV на нафтовидобувні платформи та є невід'ємною складовою технологічного процесу видобутку нафти.

3. Бурильна суспензія є складною багатокомпонентною сумішшю, яка залежно від зовнішніх умов виявляє властивості молекулярного розчину або дисперсної системи. Дисперсним середовищем бурильної суспензії, що транспортується суднами типу PSV та у подальшому використовується на морських нафтовидобувних платформах, є гідравлічне мастило. Як дисперсну фазу до бурильних суспензій вводять металоорганічні, кремнійорганічні та фторорганічні сполуки, що характеризуються у кілька разів більшою молекулярною масою, наявністю поверхні розділу фаз між ними та дисперсійним середовищем, а також високою густиною.

4. Здійснення інформаційного пошуку за напрямом дослідження, застосовуючи філософський підхід сходження від загального до окремого через часткове дозволило встановити, що питання забезпечення функціональних властивостей та експлуатаційних характеристик бурильних суспензій, стосовно морської галузі практично не вивчені. Латентне погіршення їх густини та седиментаційної стійкості не завжди може бути визначено, оцінено та усунуто судовим екіпажем. Правила їхнього транспортування, а також регулювання густини бурильної суспензії та підтримання значення густини з допустимим діапазоном неузгодженості не мають підтверджених практичних рекомендацій та вивчаються без системного підходу до розв'язання цих завдань.

5. Забезпечення технічного стану судової системи зберігання та транспортування бурильної суспензії є актуальним науково-прикладним завданням, розв'язання якого наразі не існує. Досягнення цієї мети можливо шляхом удосконалення системи зберігання та циркуляції бурильної суспензії.

Розділ 2. ЗАГАЛЬНА МЕТОДИКА ДИСЕРТАЦІЙНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ

Другий розділ присвячено визначенню методології та розробці технологічної карти дисертаційного дослідження.

2.1. Вибір теми наукового дослідження

Будь-яке виконання наукових досліджень, особливо у галузі «Транспорт», передбачає послідовне виконання логічно пов'язаних та залежних одна від одної робіт, що у методології наукових досліджень поділяють на наступні етапи: вибір теми, інформаційний пошук, експериментальні випробування, впровадження.

Наукові дослідження, що виконуються в напрямку науково-прикладних технічних завдань, спрямовані на визначення характеристик об'єкту, що вивчається; вивчення його функціональних характеристик та особливостей; встановлення взаємозв'язків, що поєднують цей об'єкт з технологічними процесами та явищами, що відбуваються за його участі; визначенню причин, що викликають зміну його технічного стану та функціонування. Підставою для проведення досліджень є запит практики, пов'язаний з розв'язанням науково-прикладного завдання, спрямованого на підвищення енергетичної, економічної, екологічної (або їхньої сукупності) ефективності роботи технічного засобу чи технічної системи [96].

Визначення раціональної методики дослідження, яка враховує функціональні та експлуатаційні особливості об'єкту дослідження та ґрунтується на наукових розробках, що виконувались у попередніх

споріднених або суміжних наукових напрямках, сприяє пошуку шляхів розв'язання науково-прикладних завдань та досягненню встановленої мети.

Процес наукових досліджень поєднує в ланцюжок ряд послідовних, пов'язаних між собою процесів, що складають основні етапи пізнання: статистичний збір, систематизацію та аналіз фактів; визначення взаємозв'язків, що їх поєднують та викликають залежність один від одного; розробка наукової теорії та формулювання наукового положення.

Обов'язковою вимогою під час проведення наукових досліджень, пов'язаних з розв'язанням прикладних науково-технічних завдань, є необхідність урахування максимально можливої кількості причин та чинників, які спричиняють вплив на їхній результат. Одночасно з цим необхідно, щоб під час проведення випробувань на об'єкті дослідження виконувались такі вимоги:

- 1) неодноразовий збіг результатів експерименту;
- 2) можливість впливу на результати експерименту з боку оператора / дослідника.

Указані вимоги характеризують об'єкт дослідження як керований. На практиці не існує абсолютно керованих об'єктів. На реальний об'єкт зазвичай впливають як керовані, так і некеровані чинники. Некеровані чинники позначаються на відтворюваності експерименту і є причиною її порушення. Якщо вимоги до відтворюваності експерименту не виконуються, виникає необхідність використовувати активно-пасивний експеримент. Погана відтворюваність результатів експериментальних досліджень може пояснюватися дією чинника, який систематично змінюється (дрейфує) в часі. У цьому випадку дослідникові необхідно використовувати спеціальні методи проведення експерименту [97].

Науковий і виробничий досвід, інтуїція, відчуття перспективи подальших досліджень у поєднанні з інформацією про поточний стан об'єкта дослідження допомагають фахівцям точніше обирати найбільш важливі цілі і напрямки розвитку, знаходити найкращі варіанти розв'язання складних

науково-прикладних завдань в умовах, коли немає інформації про попереднє рішення подібних проблем. Експертні методи безупинно розвиваються й удосконалюються. Основні напрямки цього розвитку визначаються цілою низкою чинників, у числі яких можна вказати на прагнення розширити ділянки застосування, підвищити ступінь використання методів математичного моделювання та комп'ютерної імітації, а також визначити оптимальні шляхи розв'язання поставлених завдань. Одним із методів, що сприяють розв'язання прикладних науково-дослідницьких завдань, є метод експертних оцінок.

Низький ступінь можливої формалізації деяких об'єктів дослідження, недостатні знання законів їх розвитку тощо, визначають методологічні основи використання експертних оцінок з метою забезпечення обґрунтованості прийняття рішень щодо управління ними. При цьому функції експертів можуть бути забезпечені фахівцями або чинниками. В обох випадках для оцінювання характеристик об'єктів дослідження визначають критерій / параметр, за яким виконується порівняння та на оптимізацію якого спрямовано дослідження.

Уміння визначати критерій / параметр оптимізації передбачає наявність необхідності пристроїв та приладів. У ряді випадків такого приладу може не існувати або він занадто дорогий. Якщо немає способу кількісного виміру результату, то доводиться скористатися прийомом, званим ранжуванням (ранговим підходом). При цьому параметрам оптимізації привласнюються оцінки – ранги за заздалегідь обраною шкалою: двобальною, п'ятибальною тощо. Ранговий параметр має дискретну обмежену ділянку визначення. У найпростішому випадку ділянка містить два значення (так/ні, добре/погано). Отже, ранг – це кількісна оцінка критерію/параметра оптимізації, вона носить умовний (суб'єктивний) характер. У цьому випадку відповідно до якісної ознаки ставиться певна кількість – ранг.

Для кожного фізично вимірюваного критерію / параметра оптимізації можна побудувати рангову аналогію. Потреба в побудові такої аналогії

виникає, якщо наявні в розпорядженні дослідника чисельні характеристики неточні або є невідомим спосіб побудови задовільних чисельних оцінок. За інших однакових умов завжди надається перевага фізичному виміру, оскільки ранговий підхід менш чутливий і з його допомогою важко вивчати тонкі ефекти [98].

Критерій / параметр оптимізації обов'язково повинен виражатися одним числом. Іноді це виходить природно, як показники приладу. Частіше доводиться проводити деякі обчислення. Для успішного досягнення мети дослідження необхідно, щоб параметр оптимізації дійсно оцінював ефективність функціонування системи в заздалегідь обраному сенсі. Ця вимога є основною, що визначає коректність постановки завдання.

Відносно завдань, що розв'язуються у дисертаційному дослідженні, під системою, що підлягає вивченню, будемо розглядати судна морського та внутрішнього водного транспорту. Показником, на який спрямовано дослідження, – система транспортування бурильної суспензії спеціалізованих суден класу PSV. Критерієм / параметром оптимізації – реологічні характеристики бурильної суспензії, транспортування якої виконується в вантажних танках суден класу PSV.

Вибір напрямку наукового дослідження ґрунтується на проведеній експертній оцінці можливих варіантів розв'язання завдання удосконалення системи зберігання та циркуляції бурильної суспензії під час їх транспортування на судах типу PSV та визначення способу забезпечення її функціональних характеристик за критеріями: актуальність, наукова новизна, енергетична ефективність, можливість використання та подальше впровадження на судах морського та внутрішнього водного транспорту, відповідність спеціальності.

Напрямок наукового дослідження обрано за допомогою методу експертних оцінок за наведеними вище критеріями та відображено у таблиці 2.1, де позитивній оцінці відповідає знак «+», а негативній - знак «-».

Таблиця 2.1

Порівняння можливих варіантів розв'язання завдання удосконалення системи зберігання та циркуляції бурильної суспензії під час її транспортування на судах типу PSV та визначення способу забезпечення її функціональних характеристик

Варіант розв'язання	Критерії					
	актуальність	наукова новизна	енергетична ефективність	можливість використання та подальше впровадження на судах морського та внутрішнього водного транспорту	відповідність спеціальності	сума балів
1. Ультразвукова обробка БС	+	–	+	+	–	3
2. Гідродинамічна обробка БС	+	+	–	+	+	4
3. Хімічна обробка БС	+	–	+	+	–	3
4. Додавання води та подальша сепарація БС	+	+	–	–	+	3
5. Забезпечення додаткової примусової циркуляції БС між вантажними танками	+	+	+	+	+	5

Експертна оцінка методу ультразвукової обробки БС встановила, що під час ультразвукової обробки у потоці рідини відбувається імпульсне підвищення та зниження тиску в локальних обсягах рідини. При цьому, за рахунок виникнення кавітаційних процесів, виникають додаткові турбулентні потоки, які підвищують однорідність та запобігають розшаруванню рідини. Наукові дослідження у цьому напрямку постійно розвиваються, вивчаються та вдосконалюються методи та режими дії ультразвукових хвиль на рідинне середовище, що підтверджує їхню

актуальність. При цьому наукова новизна цього методу наразі майже вичерпана, практично для всіх типів рідин встановлено взаємозв'язок між структурними характеристиками та хвильовими навантаженнями, що накладаються з боку генератора ультразвукових хвиль [52]. Обробка рідини ультразвуком вимагає встановлення додаткового обладнання, яке споживає енергію. При цьому подальше підтримання функціональних характеристик технічних рідин (зокрема БС) забезпечує його енергетичну ефективність [97, 98].

Під час гідродинамічної обробки потік рідини піддається ударним силовим навантаженням змінної частоти з одночасним збільшенням швидкості та зміною напрямку її руху. Це сприяє розриву молекулярних зв'язків між елементами дисперсної фази та підтримці дисперсності та однорідності всього об'єму рідини. Метод гідродинамічної обробки інтенсивно вивчався та впроваджувався для різних енергетичних установок (також судових) [99]. Основний його недолік – підвищена потужність спеціального обладнання, що впливає на потік рідини. Крім того, порушення технології гідродинамічної або ультразвукової обробки технічних рідин (зокрема БС) може призвести до надмірного подрібнення дисперсної фази та подальшого зниження їх триботехнічних характеристик [100]. Це згодом негативно впливатиме на процес буріння.

Оцінка вагомості та значущості хімічної обробки встановила, що під час його використання в обсяг рідини вводяться додаткові реагенти, які за допомоги міжмолекулярних взаємодій забезпечують підтримання однорідності рідини на потрібному рівні протягом періодів зберігання та транспортування [101]. Одночасно з цим після хімічної обробки у складі суспензій залишаються реагенти, які негативно впливають на металеві або синтетичні елементи системи буріння нафтових свердловин та циркуляції БС. Крім того, легкі фракції цих реагентів можуть випаровуватися з відкритої поверхні та негативно впливати на екологію [102]. Важкі – підвищують рівень механічних втрат під час її циркуляції [103]. Це обмежує можливість

використання цього методу на суднах морського та внутрішнього водного транспорту.

Експертні оцінки методу додавання води та подальша сепарація БС висвітлили наступне. Використання цього методу сприяє вирівнюванню густини технічних рідин за висотою та об'ємом, але наступний етап – сепарація, по-перше, вимагає додаткових витрат енергії; по-друге, під час його проведення разом із водою з технічної рідини (бурильної суспензії) видаляються спеціальні компоненти, що були введені до неї для забезпечення її функціональних характеристик. Також необхідно визначити, що цей метод недоцільний до використання на морських суднах через введення до БС прісної води, це вимагає додаткових об'ємів вантажних танків, кількість яких на суднах класу PSV обмежена, та викликає необхідність збереження технологічної води після завершення процесу сепарації.

Аналіз методу забезпечення додаткової примусової циркуляції БС між вантажними танками як спосіб удосконалення системи зберігання та циркуляції бурильної суспензії під час її транспортування на суднах типу PSV встановив, що він відповідає всім критеріями, що висувуються, а саме: відрізняється актуальністю, характеризується науковою новизною, забезпечує енергетичну ефективність, доступний до використання та подальшого впровадження на суднах морського та внутрішнього водного транспорту, відповідає спеціальності.

Таким чином, за результатом проведеного методу експертних оцінок, як метод, що більш ніж інші сприяє удосконаленню системи зберігання та циркуляції бурильної суспензії під час її транспортування на суднах типу PSV, визнано забезпечення додаткової примусової циркуляції БС між вантажними танками.

Враховуючи обраний напрямок наукового дослідження, а також на підставі результатів аналізу інформаційного пошуку, виконаного в першому розділі, було визначено тему наукового дослідження – удосконалення системи зберігання та циркуляції бурильної суспензії на суднах типу PSV.

Основним обґрунтуванням вибору теми досліджень також є:

- спеціалізовані судна типу PSV експлуатуються великою кількістю країн, які виконують роботи з дослідження та розробки нафтових та газових родовищ та подальшого видобування вуглеводних копалин;

- суднові системи зберігання та циркуляції БС є складової суднового енергетичного комплексу та її існування є однією з характерних ознак суден типу PSV;

- бурильні суспензії, що транспортуються суднами типу PSV на нафтодобувні платформи, забезпечують подальший технологічний процес видобування вуглеводних копалин та є його невід'ємним ланцюгом;

- енергетичну установку суден типу PSV не поділяють на головну та допоміжну, потужність суднових дизелів, що на них встановлюються, одночасно споживається рушіями та допоміжним обладнанням; тому будь - яке зменшення втрат енергії на забезпечення роботи споживачів призводить до підвищення надійності, живучості та маневреності всього судна.

Важливість проведення досліджень, пов'язаних із питаннями удосконалення системи зберігання та циркуляції бурильної суспензії на судах типу PSV, підтверджується програмою економічних реформ, що проводяться в Україні, а також Транспортною стратегією України на період до 2030 року. З метою створення ефективно працюючого транспортного комплексу Стратегія, зокрема враховує світову тенденцію до використання високотехнологічних та ергономічних транспортних засобів. Дослідження, що виконані в дисертаційній роботі, відповідають наступним основним напрямкам впровадження Стратегії:

- конкурентоспроможна та ефективна транспортна система;
- безпечний для суспільства, екологічно чистий та енергоефективний транспорт;
- безперешкодна мобільність та міжрегіональна інтеграція;
- прискорення й забезпечення своєчасної доставки вантажів завдяки швидкісним видам транспорту та розвитку логістики.

Як **об'єкт дослідження** визначено процес транспортування бурильної суспензії суднами класу Platform Supply Vessels.

Як **предмет дослідження** прийнято процес керування реологічними характеристиками бурильної суспензії.

Розв'язання завдань, визначених у дисертаційному дослідженні, є продовженням розробок наукової школи к-та техн. наук, проф. Колегаєва М.О. та його послідовників к-та техн. наук, доц. Кар'янського С.А., к-та техн. наук Мацкевича Д.В., ці розробки базуються на експериментальних та теоретичних дослідженнях, що спрямовані на забезпечення енергетичної ефективності морських спеціалізованих суден та підтримання / поновлення реологічних характеристик суднових технічних рідин, що використовуються на судах морського та внутрішнього водного транспорту [104-107].

2.2. Обґрунтування мети і завдань дисертаційного дослідження

Підставою проведення наукових досліджень, результати яких наведені в дисертаційній роботі, є такі **запити практики**:

- необхідність підтримання функціональних характеристик бурильних суспензій під час їх транспортування суднами класу PSV;
- зниження енергетичних втрат на процес перекачування (видачу / приймання) БС з борту судна на нафтовидобувну платформу;
- забезпечення технічного стану суднової системи зберігання та транспортування бурильної суспензії, що спрямовані на розв'язання актуального науково-прикладного завдання – підвищення енергетичної ефективності суден класу PSV.

Метою дослідження є підтримка функціональних характеристик бурильних суспензій під час їх транспортування суднами класу PSV.

Основною науковою гіпотезою дослідження є теза про те, що підтримка функціональних характеристик бурильних суспензій під час їх транспортування суднами класу PSV забезпечується шляхом керованого впливу на їх густину та седиментаційну стійкість.

Головне завдання наукового дослідження полягає в удосконаленні системи зберігання та циркуляції бурильної суспензії під час її транспортування на суднах типу PSV та визначення способу забезпечення її функціональних характеристик.

Для розв'язання головного завдання дослідження розв'язані наступні **допоміжні завдання**:

- 1) визначення діапазону латентної зміни реологічних характеристик бурильних суспензії в умовах їх збереження та транспортування морськими спеціалізованими суднами;
- 2) визначення кількісного та якісного критерію оцінки зміни густини та седиментаційної стійкості бурильної суспензії під час її транспортування;
- 3) визначення впливу додаткової примусової Х-подібної циркуляції бурильної суспензії на її реологічні характеристики;
- 4) визначення схеми встановлення додаткового обладнання, за якою забезпечуються мінімальні гідравлічні та енергетичні втрати в системі зберігання та циркуляції бурильної суспензії.

Перше допоміжне завдання передбачає виконання експериментальних досліджень з визначення латентної зміни реологічних характеристик (густини та седиментаційної стійкості) БС за глибиною вантажного танку, в якому виконується її перевезення.

Під час розв'язання другого допоміжного завдання необхідно аналітичним шляхом визначити експлуатаційні характеристики БС, за якими доцільно виконувати кількісне та якісне оцінювання зміни реологічних характеристик бурильної суспензії під час її транспортування.

Для розв'язання третього допоміжного завдання потрібно за допомогою експерименту визначити вплив додаткової примусової Х-подібної циркуляції на зміну реологічних характеристик БС

Розв'язання четвертого допоміжного завдання ґрунтується на досвіді експлуатації систем транспортування БС, через який потрібно визначити ділянку суднової системи збереження та транспортування БС, на якій є доцільним встановлення мобільного обладнання та забезпечення додаткової примусової циркуляції БС, а також запропонувати схему приєднання додаткового обладнання до загальної системи збереження та транспортування БС.

Розв'язання кожного допоміжного завдання передбачає отримання відповідних наукових результатів.

Розв'язання головного завдання дисертаційного дослідження забезпечується шляхом синтезу наукових результатів допоміжних завдань.

2.3. Системний підхід до проведення наукового дослідження

Наразі в судновій енергетиці питання підтримки та поновлення реологічних характеристик технічних рідин розв'язується стосовно палива та мастила, які використовуються для забезпечення роботи теплових двигунів. У багатьох нормативних документах, інструкціях з експлуатації, рекомендаціях з використання надаються контрольні, максимально можливі та бракувальні значення таких показників як в'язкість, густина, температури спалаху тощо. Подібних рекомендацій та обмежень для БС на сьогодні не існує, тому експлуатація суднових транспортування та збереження БС виконується на підставі власного досвіду морських інженерів. Але при цьому не існує системного підходу, реалізація якого:

- забезпечувала б підтримку реологічних характеристик БС під час їх транспортування суднами класу PSV;
- попереджувала б розшарування БС та утворення осаду з важких компонентів;
- сприяла керуванню реологічними характеристиками БС у широкому діапазоні експлуатаційних навантажень на енергетичне обладнання систем збереження та транспортування БС;
- функціонувала б незалежно від зовнішніх умов і швидкісних характеристик морського судна;
- дозволяла б експлуатацію систем збереження та транспортування БС у різних акваторіях Світового океану, в тому числі в особливих екологічних районах та районах очікування вантажних операцій;
- не впливала б на остійність та ходовість судна;
- гарантувала б надійну та безаварійну експлуатацію суднового пропульсивного комплексу.

Системний аналіз та системний підхід до розв'язання наукових завдань дозволяють оцінити всі чинники, що сприяють досягненню поставленої мети, та визначити оптимальні способи її досягнення [108, 109]. Визначення «система» належить до філософської категорії наукового пізнання, а комплекс допоміжних завдань, які потрібно розв'язати у будь-якому дисертаційному дослідженні, переводить це поняття у категорію складних систем. Під час розв'язання науково-прикладних завдань розглядаються складні системи, що складаються з великої кількості окремих елементів, які зокрема знаходяться між собою у взаємозв'язку та взаємодії. На базі системного аналізу суден морського та внутрішнього водного транспорту, запропонованого українським вченим-дослідником В.А. Голіковим [96], до таких систем (з точки зору системного підходу) можна віднести судновий пропульсивний комплекс, а також систему транспортування БС, функціонування якої забезпечується її енергетичним обладнанням та приладами контролю. З урахуванням загальної теорії систем методології

наукових досліджень [110, 111] та системного підходу до проблеми безпечного управління судном [112], суднову систему збереження та транспортування БС можна представити як складну багатокомпонентну систему, з динамічно змінюваними контрольованими і регульованими параметрами, що складається з додаткових підсистем. Дослідження процесів, які перебігають у окремих підсистемах, призводить до розв'язання завдань із забезпечення екологічної, економічної, та енергетичної ефективності суднової енергетичної установки та всього пропульсивного комплексу [113].

Складну, багатокомпонентну систему, яка відповідає темі дисертації «Удосконалення системи зберігання та циркуляції бурильної суспензії на судах типу PSV» можливо відобразити у вигляді схеми, що надана на рис. 2.1.

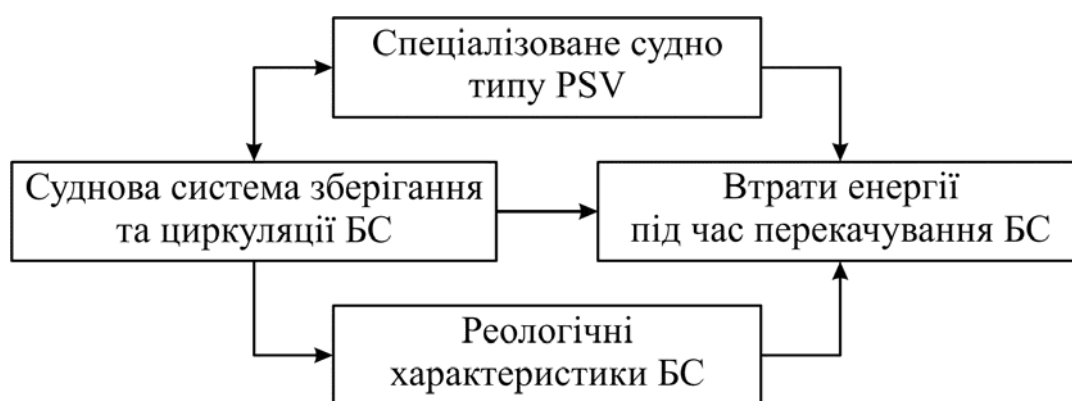


Рис. 2.1. Схема взаємозв'язків в системі зберігання та БС суспензії на судах типу PSV

Компоненти цієї системи «спеціалізоване судно типу PSV» та «суднова система зберігання та циркуляції БС» мають двосторонній зв'язок. Зміна експлуатаційних характеристик судна, зокрема осадці, призводить до відповідного зменшення / збільшення висоти надводного борта та висоти, на яку потрібно підняти БС під час її викачки на НВП. Географічний район виконання робіт з забезпечення нафтодобувних робіт, метеорологічні умови, в яких рухається судно типу PSV, також впливають на ефективність суднової системи зберігання та циркуляції БС. Вплив суднової системи зберігання та

циркуляції БС на спеціалізоване судно типу PSV виявляється в здатності системи підтримувати необхідні експлуатаційні характеристики БС. Їхнє надмірне погіршення призводить до збільшення часу, якій витрачається на обслуговування системи, що збільшує час між завантаженням та розвантаженням судна.

Під час транспортування БС судновою системою зберігання та циркуляції трапляється поступова зміна реологічних характеристик БС. Інтенсивність та наслідки цієї зміни пов'язані з технічним станом, удосконаленістю та працездатністю системи.

Стан суднової системи зберігання та циркуляції БС, а також реологічні характеристики БС впливають на втрати енергії під час перекачування БС з борту судна на НВП. Їхнє погіршення призводить до збільшення часу, що потрібний на виконання вантажних операцій, що також підвищує ходовий час судна або час очікування видачі БС на НВП.

У зв'язку з тим, що на судах типу PSV один і той же ДВЗ забезпечує потужністю рух судна та роботу допоміжного обладнання, зміна втрат енергії під час перекачування БС пов'язана з часткою енергії, що спрямовується на забезпечення ходовості судна (зокрема маневрових якостей). Тому будь-яке зменшення цих втрат призводить до збільшення енергії, яку можливо використати для руху судна або перерозподілити на інші здобувачі.

Тема дисертаційної роботи формується на підставі запиту практики. На підставі зазначеної теми формулюється мета дослідження та висувається наукова гіпотеза, що сприяє досягненню мети. Головне завдання дисертаційного дослідження відображає конкретне наукове завдання, досягненню якого присвячена робота. Розв'язанню головного завдання забезпечується допоміжними завданнями, кожна з яких має свій окремий науковий результат. За допомоги синтезу наукових результатів допоміжних завдань встановлюється розв'язання основного завдання. Наукові результати становлять раніше невідоме кількісне співвідношення, аналітичну залежність, новий метод оцінювання процесу та показників, що вивчаються в

дослідженні та підтверджуються експериментальними дослідженнями. Наукові результати характеризуються науковою значимістю та практичною цінністю.

На підставі наукових результатів формулюється наукове положення, що є узагальненням результатів та розв'язує головне завдання дослідження та виражає у формі тези вперше встановлену неочевидну, а іноді несподівану закономірність, що збагачує теорію (науку) та корисно для практики, або встановлює принципово нові якості предмету дослідження, фізичних та інших процесів та явищ. Наукове положення підтверджує висунуту наукову гіпотезу та мету дослідження.

З урахуванням викладеного у дисертаційному дослідженні було розроблено замкнутий цикл наукового дослідження, який системно представлений у вигляді технологічної карти дослідження [96, 114], яка наведена на рис. 2.2.

2.4. Організація та забезпечення експериментальних досліджень

Експериментальні дослідження складались з розробки та побудови і моделі об'єкта, планування та проведення експерименту, аналізу результатів дослідження, співставлення результатів експерименту та математичної моделі, поширення експериментів на судна різного дедвейту та БС з різними реологічними та структурними характеристиками.

Основні експериментальні дослідження, які виконані в дисертаційній роботі, проводилися в лабораторних (на базі дослідницьких лабораторій Національного університету «Одеська морська академія») та виробничих (на морських судах типу PSV іноземного власника) умовах.

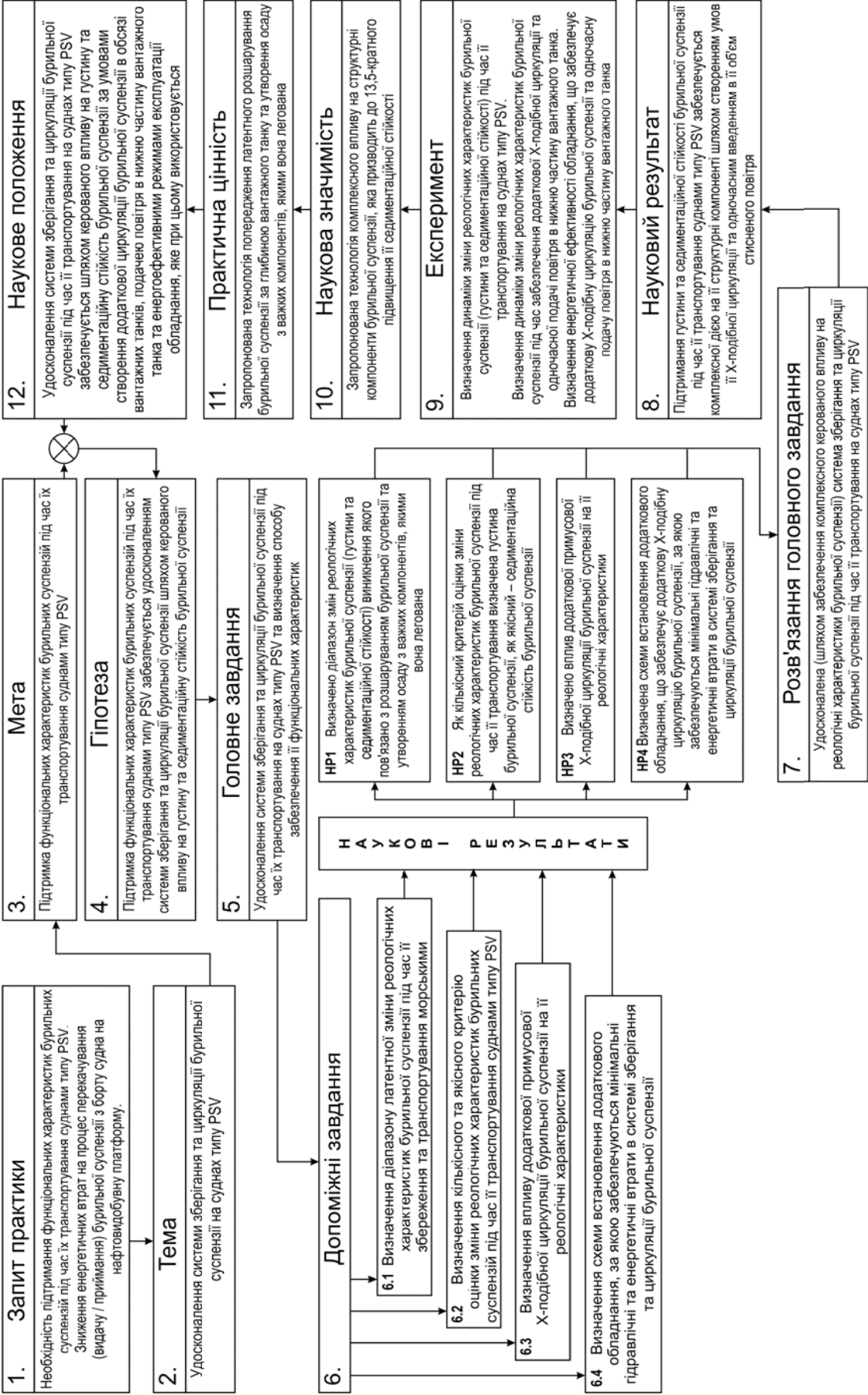


Рис. 2.2. Технологічна карта наукового дослідження

Математичне моделювання виконувалось у науково-дослідницькій лабораторії за допомоги комплексу ANSYS. Зокрема розраховувались значення густини та седиментаційної стійкості БС на різних глибинах вантажного танку з урахуванням:

- компонентного складу БС;
- характеристик вантажних танків судна класу PSV;
- параметрів роботи суднового обладнання, що входить до складу системи транспортування БС;
- зовнішніх (хвилювання моря, осадки, крену та диференту судна) та внутрішніх (температури та вологості повітря) чинників.

У виробничих умовах виконувалось вимірювання:

- густини БС за різною глибиною вантажного танка (за допомоги ареометрів Anton Paar DMA35 Tag&Log компанії LEMIS Baltic, Латвія-Німеччина та dm-230.1a фірми Woppe & Reuther Messtechnik, Німеччина);
- продуктивності вантажних насосів (за допомоги вітратомірів, встановлених в систему транспортування БС);
- потужності вантажних насосів (за допомогою ватметрів локальних та центрального посту управління);
- часу, що потрібний на перекачування приймання / викачування БС з борта судна на нафтовидобувну платформу (за допомоги електронного таймеру);
- часу проведення експериментів (за допомоги електронного таймеру);
- швидкості руху судна, інтенсивності зовнішніх збурень (сили повітря, хвилювання моря, глибини під кілем), осадки, крену та диференту судна під час руху та перекачування приймання / викачування БС з борта судна на нафтовидобувну платформу (за допомоги суднового навігаційного обладнання).

Для визначення вказаних показників використовувались суднові вимірювальні прилади та інформаційні системи Під час проведення

експериментів похибка у визначенні всіх вищевказаних показників не перевищувала $\pm 2,5$ %.

Усе суднове обладнання та контрольно-вимірювальні прилади були схвалені з боку Регістра, що виконує технічний нагляд на судна типу PSV, на яких виконувались дослідження. Експлуатація суднового обладнання під час проведення експериментальних досліджень виконувалась із суворим забезпеченням вимог та рекомендації інструкцій з експлуатації, із виключенням та запобіганням режимів перевантаження (за витратою або потужністю) та аварійних режимів, а також з виконанням екологічних вимог, що регламентовані міжнародними та національними конвенціями.

Роботи з удосконалення суднової системи збереження та циркуляції БС виконувались за погодженням з технічним департаментом судноплавної компанії, що здійснює менеджмент судна. Всі роботи з удосконалення виконувались судновим екіпажем (без залучення інших фахівців) за час, що відповідає стоянковому режиму роботи судна.

Дослідження на спеціалізованих судна класу PSV виконувались у судновій системі зберігання та циркуляції БС, що мала наступну комплектацію:

- без зміни конструкції та способу транспортування БС;
- з додатковою комплектацією мобільним обладнанням, що забезпечує Х-подібну циркуляцію БС між вантажними танками, що знаходяться поруч один до одного;
- з додатковою комплектацією мобільним обладнанням, що забезпечує Х-подібну циркуляцію БС між вантажними танками, що знаходяться поруч один до одного та одночасну подачу повітря в нижню частину вантажного танка.

Цикл експериментальних досліджень виконувався відповідно до блок-схеми, що надана на рис. 2.3.

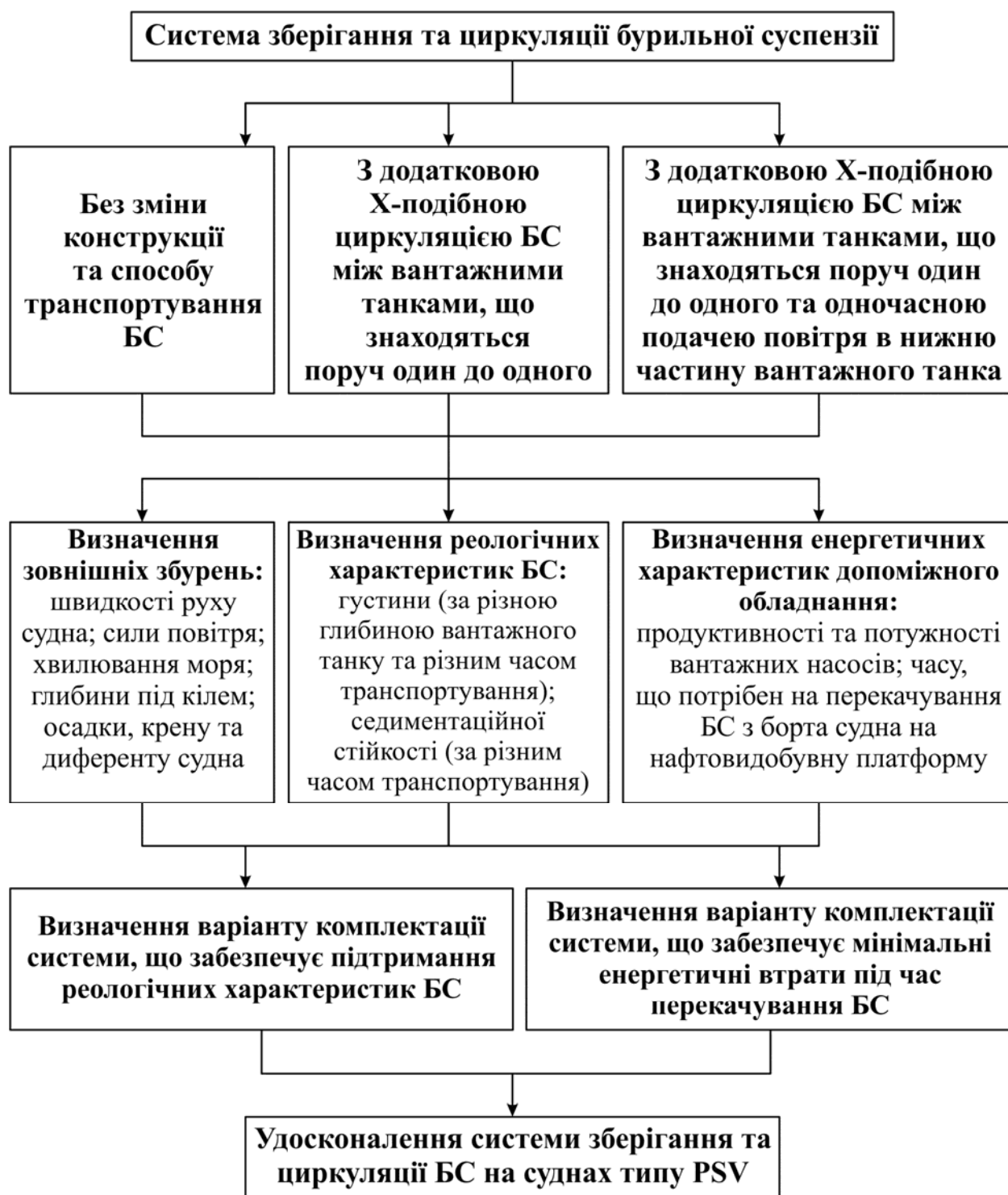


Рис. 2.3. Блок-схема проведення експериментальних досліджень з підтримки функціональних характеристик БС під час їх транспортування суднами типу PSV

2.5. Висновки за розділом 2

1. У результаті вибору теми дослідження, застосовуючи метод експертного оцінювання за чинниками: актуальність, наукова новизна, енергетична ефективність, можливість використання та подальше впровадження на суднах морського та внутрішнього водного транспорту, відповідність спеціальності. Сформульована тема, яка спрямована на забезпечення енергетичної ефективності морських спеціалізованих суден та підтримання / поновлення реологічних характеристик суднових технічних рідин, що використовуються на суднах морського та внутрішнього водного транспорту.

Як **об'єкт дослідження** обрано процес транспортування бурильної суспензії суднами класу Platform Supply Vessels.

Предметом дослідження визначено процес керування реологічними характеристиками бурильної суспензії.

2. Метою дослідження є підтримка функціональних характеристик бурильних суспензій під час їх транспортування суднами типу PSV.

3. Головним завданням дисертаційного дослідження є удосконалення системи зберігання та циркуляції бурильної суспензії під час її транспортування на суднах типу PSV та визначення способу забезпечення її функціональних характеристик.

4. Розв'язання головного завдання дисертаційного дослідження забезпечено шляхом синтезу наукових результатів, що отримані як результат чотирьох допоміжних завдань.

5. За допомогою системного підходу розроблена технологічна карта наукового дослідження, що визначає його основні етапи та результати.

Розділ 3. ДОСЛІДЖЕННЯ ФУНКЦІОНАЛЬНИХ ХАРАКТЕРИСТИК БУРИЛЬНИХ СУСПЕНЗІЙ, ЯК ДИСПЕРСНИХ СИСТЕМ

Третій розділ дисертаційного дослідження присвячено розв'язанню 1-го та 2-го допоміжних завдань, якими є:

- визначення діапазону латентної зміни реологічних характеристик бурильних суспензій в умовах їх збереження та транспортування морськими спеціалізованими суднами;
- кількісного та якісного критерію оцінки зміни реологічних характеристик бурильних суспензій під час їх транспортування суднами типу PSV.

Основні результати розділу 3 висвітлені в джерелах [2], [95], [170], [172], [175], [178], [179], [180], [181], [182].

3.1. Загальна характеристика бурильних суспензій як дисперсних систем

Дисперсними системами (або дисперсіями) називають гетерогенні, переважно мікрогетерогенні, двох та багатofазні системи, у яких принаймні одна з фаз знаходиться у дисперсному стані. Зазвичай дисперсна система розглядається як сукупність частинок дисперсної фази та навколишнього їх суцільного дисперсійного середовища.

Спільними для всіх дисперсних систем є дві основні ознаки – дисперсність та гетерогенність. Системи, що мають зазначені ознаки, є об'єктами вивчення колоїдної хімії – науки, яка вивчає особливості будови і властивостей дисперсних систем і процесів, що в них відбуваються, у зв'язку з їхньою дисперсністю [115].

Особливе місце в колоїдній хімії займають розчини високомолекулярних суспензій (ВМС), які, незважаючи на те що є істинними молекулярними розчинами, наразі мають ряд ознак, загальних з високодисперсними гетерогенними системами, завдяки гігантським порівняно зі звичайними молекулами розмірам їхніх макромолекул. За такими властивостями, як оптичні, електричні, структурно-механічні, дифузійні тощо. Розчини ВМС знаходяться ближче до дисперсних систем, ніж до молекулярних розчинів. Тому розчини ВМС часто належать до колоїдних дисперсних систем і називають молекулярними колоїдами [116]. У звичайних дисперсних системах дисперсна фаза представлена дрібними частинками (твердими, рідкими, газоподібними), тонкими плівками, мембранами, волокнами з чітко вираженими поверхнями розділу цих фаз, найчастіше мікроскопічних.

Дисперсні системи характеризуються чималим спектром властивостей, таких як кінетичні, молекулярно-кінетичні, електричні, оптичні, реологічні, структурно-механічні. Значимість цих властивостей різна залежно від характеристики дисперсних систем, їх існування, застосування. Зокрема, для бурової технології вкрай важливе вміння керувати такими властивостями:

- кінетичними (седиментаційна стійкість) [117];
- молекулярно-кінетичними (осмос, дифузія), електричними (електропровідність, питомий опір) [118];
- електрохімічними (корозія, кислотність середовища) [119];
- реологічними та структурно-механічними (густина, в'язкість, динамічна та статична напруга зсуву) [120].

Саме цим ознакам та характеристикам відповідають БС, які транспортуються суднами PSV на НВП та у подальшому забезпечують технологічний процес видобутку нафти.

3.1.1. Стійкість бурильних суспензій як дисперсних систем

У поняття стійкості дисперсних систем (зокрема БС) входить сталість дисперсності й рівномірний розподіл частинок дисперсної фази обсягом дисперсійного середовища. Проблема стійкості дисперсних систем є однією з центральних у колоїдній хімії, оскільки втрата стійкості може призвести, врешті-решт, до поділу фаз та критичного зниження функціональних характеристик дисперсної системи. Стійкість дисперсних систем поділяється на два види: агрегативну та кінетичну (седиментаційну). Об'єднання частинок дисперсної фази агрегати означає втрату дисперсною системою агрегативної стійкості. Якщо частинки дисперсної фази осідають або спливають, зазвичай це відбувається після агрегування, злипання частинок, система втрачає і седиментаційну стійкість [121, 122].

При втраті седиментаційної стійкості частка дисперсної фази осідає під дією гравітаційної сили (сили тяжіння).

$$F_d = mg = \rho Vg,$$

де m , ρ , V – відповідно маса, густина та об'єм частинки.

Протидіють осіданню частинки сила Архімеда F_A та сила тертя $F_{тр}$, які відповідно дорівнюють:

$$F_A = \rho_0 Vg \quad \text{та} \quad F_{тр} = \varphi v,$$

де ρ_0 , φ , v – густина середовища, коефіцієнт тертя та швидкість осідання відповідно.

Швидкість осідання дорівнює нулю за умови рівноваги, тобто

$$F_d = F_A + F_{тр}.$$

Звідси можна знайти швидкість осідання частинки, якщо відомий коефіцієнт тертя, який можна знайти за формулою (законом) Стоксу для рідин (для частинки сферичної форми)

$$\varphi = 6\pi r\mu.$$

Тоді швидкість осідання буде дорівнювати:

$$v = \frac{2g(\rho - \rho_0)r^2}{9\mu}. \quad (3.1)$$

Для БС, що знаходиться у вантажному танку глибиною h , час осідання частинок дисперсної фази можна розрахувати за виразом

$$t = \frac{v}{h} = \frac{2g(\rho - \rho_0)r^2}{9\mu h}.$$

Формула (3.1) застосовна за таких припущень:

- відсутня турбулентність під час осідання частинок;
- розмір часток дисперсної фази від 5 до 100 мкм;
- частинки дисперсної фази осідають незалежно одна від одної [123].

З (3.1) випливають дуже важливі рекомендації для підвищення седиментаційної стійкості дисперсних систем: необхідно знижувати різницю густини дисперсного середовища та дисперсної фази, розмір частинок дисперсної фази та підвищувати в'язкість дисперсного середовища. Стосовно БС дисперсним середовищем є мінеральне / гідравлічне мастило, дисперсною фазою – важкі компоненти, якими вона легована.

Ці рекомендації широко використовують у буровій технології задля забезпечення необхідної стійкості БС [124, 125].

Оскільки стійкість дисперсних систем безпосередньо пов'язана із взаємодією частинок дисперсної фази, з їхньою коагуляцією, всі теорії стійкості, які існують, спираються на встановлені закономірності поведінки дисперсних систем залежно від балансу сил тяжіння та відштовхування частинок.

Широке визнання здобула теорія стійкості дисперсних систем, що розглядає процес коагуляції як результат спільної дії Ван-дер-Ваальсових сил тяжіння та електростатичних сил відштовхування дифузних шарів іонів, що оточують частинки дисперсної фази. Ця теорія була розвинена Б.В. Дерягіним та Л.Д. Ландау, а також голландськими вченими Е. Фервеем та Дж. Овербеком (теорія ДЛФО). Дерягін Б.В. ввів поняття розклинювальний тиск, який виникає в тонкому прошарку рідини між поверхнями твердих тіл, що зближуються. Якщо тиск, що виникає в плівці при її стисненні (потоншенні), запобігає з'єднанню частинок, воно позитивне, якщо ні - негативне [126].

3.1.2. Стабілізація дисперсних систем

Під стабілізацією дисперсних систем розуміється забезпечення тривалої стійкості дисперсних систем при заданих параметрах системи. БС належать до термодинамічних стійких дисперсних систем, однак і вони потребують стабілізації, оскільки їхні вихідні параметри можуть виходити за межі вимог (регламенту) під дією зовнішніх збурень, що надходять до системи.

Виділяють три основні чинники стабілізації:

- структурно-механічний;
- розклинювальний тиск;
- кінетичний [127].

Цей поділ чинників досить умовний, оскільки вони взаємопов'язані, об'єктом їхнього впливу є тонкі міжфазні прошарки, зміна вихідних параметрів яких завжди вдається пов'язати з видом впливів.

Структурно-механічний чинник стабілізації (за П.А. Ребіндером «структурно-механічний бар'єр») – це чинник найбільш сильної стабілізації, здатний успішно регулювати агрегативну стійкість полідисперсних систем в умовах різних мінералізацій та температур середовища [128].

Розклинювальний тиск, як чинник стабілізації дисперсних систем, пов'язаний із виникненням тисків під час стиснення (деформування) плівок, що розділяють поверхні. Розклинювальний тиск виявляє себе через іонно-електростатичну, адсорбційну (молекулярну), в'язкісну та структурну складові.

Кінетичний чинник стабілізації, що характеризує зміну геометричних розмірів (насамперед товщини) захисних адсорбційних шарів у часі, пов'язаний, в основному, з модулем ефективної пружності, а також з в'язкістю плівок, що стискаються.

3.2. Аналіз функціональних характеристик бурильних суспензій як дисперсних систем

БС є вільною дисперсною системою, в якій частинки дисперсної фази можуть відносно вільно переміщатися по всьому об'єму дисперсійного середовища. Це визначає їхні загальні кінетичні властивості, зокрема броунівський рух, дифузія, осмос та седиментація. Усі вони обумовлені молекулярно-кінетичним чи тепловим рухом. Теоретичне обґрунтування броунівського руху було дано А. Ейнштейном і М. Смолуховським. Відповідно до розробленої ними молекулярно-кінетичної теорії молекули рідкого або газоподібного середовища знаходяться в безперервному

хаотичному русі і постійно змінюють напрямок руху в результаті зіткнення одна з одною і дисперсними частинками. Середня кінетична енергія кожної частинки чи молекули дорівнює:

$$\overline{E} = \frac{m\overline{u}^2}{2} = \frac{3}{2}k_B T, \quad (3.1)$$

де m – маса частинки;

$\overline{u}$ – середня швидкість частинки;

k_B – константа Больцмана;

T – абсолютна температура [123, 129].

Ейнштейн та Смолуховський встановили кількісний зв'язок між середнім зрушенням частинки Δ та коефіцієнтом дифузії D :

$$\overline{\Delta}^2 = 2D\tau \quad \text{або} \quad \overline{\Delta} = \sqrt{2D\tau}. \quad (3.2)$$

Коефіцієнт дифузії згідно з Ейнштейном має такий загальний вигляд:

$$D = \frac{k_B T}{B} = \frac{RT}{N_A B}, \quad (3.3)$$

де R – універсальна газова постійна;

B – коефіцієнт тертя або гідродинамічного (в'язкого) опору;

N_A – число Авогадро.

Підставивши коефіцієнт дифузії D у вираз (3.2) отримаємо:

$$\overline{\Delta}^2 = 2D\tau = \frac{2k_B T}{B} \tau = \frac{2RT}{N_A B} \tau. \quad (3.4)$$

Ця залежність називається рівняння Ейнштейна-Смолуховського. Для сферичних частинок з урахуванням закону Стокса

$$B = 6\pi\eta r,$$

де η – коефіцієнт в'язкості;

r – розмір частинки,

рівняння (3.4) набуде вигляду:

$$\overline{\Delta^2} = \frac{k_B T}{3\pi\eta r} \tau = \frac{RT}{3\pi\eta r N_A} \tau. \quad (3.5)$$

З рівняння (3.5) випливає, що частинки переміщуються тим швидше, чим вища температура T , менше розмір частинки r і в'язкість середовища η .

Справедливість цього закону була підтверджена багатьма вченими не тільки для молекулярних систем (газів та рідин), але і для ультрамікрогетерогенних систем, таких як аерозолі та ліозолі. Зіставлення законів молекулярно-кінетичної теорії до колоїдних систем дозволяє використовувати їх для визначення розмірів частинок та молекулярної маси макромолекул.

Якщо броунівський рух є наслідком теплового руху молекул середовища, можна говорити також про тепловий рух частинок дисперсної фази. Це означає, що дисперсна фаза, що представляє собою сукупність числа частинок, повинна підпорядковуватися тим же статистичним законам молекулярно-кінетичної теорії, що використовуються до газів і розчинів. З цих законів Ейнштейном і Смолуховським під час розробки даної теорії було обрано закон дифузії, за яким хаотичність броунівського руху має призводити до вирівнюванню концентрації дисперсної фази з усього обсягу дисперсійної середовища [130].

Процес дифузії завжди незворотній, він виявляється у переносі речовини від місця з більшою концентрацією до місця з меншою концентрацією та перебігає до повного вирівнювання. Ступінь неvirівнюваності (зміна концентрації на одиницю відстані), названа градієнтом концентрації, зумовлює перебіг цього процесу. Дифузія закінчується настанням рівноваги, що характеризується рівномірним розподілом частинок або молекул у всьому обсязі системи.

Швидкість дифузії виражається першим законом Фіка:

$$\frac{1}{S} \cdot \frac{dm}{d\tau} = - \frac{dc}{dx} D,$$

де dm – кількість дифузної речовини, моль;

$d\tau$ – час, с;

S – площа поперечного перерізу, через яку дифундує речовину, m^2 ;

dc/dx – градієнт концентрації, моль/м;

D – коефіцієнт дифузії; m^2/c .

Величина коефіцієнта дифузії D згідно з Ейнштейном визначається рівнянням (3.3), а для сферичних частинок при дотриманні закону Стокса вона набуває вигляду:

$$D = \frac{k_B T}{6\pi\eta r} = \frac{RT}{N_A 6\pi\eta r}.$$

Оскільки коефіцієнт дифузії обернено пропорційному радіусу частинок, а розмір колоїдних частинок набагато перевищує розмір звичайних молекул, то дифузія в колоїдних розчинах (до яких належать БС) проходить вкрай повільно.

Характерною властивістю суспензій, емульсій, порошків та аерозолів є схильність до осідання (седиментації) або спливу (зворотної седиментації) частинок дисперсної фази [131].

На кожну частину в системі діє сила тяжіння (гравітаційна сила) F_g та підйомна сила Архімеда F_A :

$$F_g = mg = V\rho g; \quad F_A = V\rho_0 g,$$

де m – маса;

V – обсяг частинки;

g – прискорення вільного падіння;

ρ та ρ_0 – густина частинок дисперсної фази та дисперсійного середовища відповідно.

Ці сили постійні та спрямовані у протилежні сторони. Рівнодіюча сила, що викликає седиментацію, дорівнює:

$$F_{\text{сед}} = F_g - F_A = m_{\text{від}} g = V(\rho - \rho_0)g,$$

де $m_{\text{від}} = m - V\rho_0$ – відносна маса частинки (з урахуванням густини середовища).

Якщо $\rho > \rho_0$, то $F_{\text{сед}} > 0$, і частинка осідає, якщо $\rho < \rho_0$, то $F_{\text{сед}} < 0$, і частинка спливає.

Оскільки седиментація протікає у певному середовищі, то під час ламінарного руху частинки виникає опір середовища – сила тертя, пропорційна швидкості руху частинки:

$$F_{\text{тр}} = k_{\text{тр}} u,$$

де $k_{\text{тр}}$ – коефіцієнт тертя;

u – швидкість руху частинок [123].

Таким чином, під час руху на частинку діє спільна сила:

$$F = F_{\text{сед}} - F_{\text{тр}} = Vg(\rho - \rho_0) - k_{\text{тр}}u. \quad (3.6)$$

Під дією цієї сили, що викликає седиментацію, частинка починає прискорений рух. У перший момент швидкість осідання дуже мала, але з її прискореного збільшення сила опору зростає. З моменту, коли сила тертя досягне сили, що викликає седиментацію, швидкість руху частинки стає постійною її можна визначити з рівняння (3.6) за умови $F=0$:

$$u = \frac{m_{\text{отн}}g}{k_{\text{тр}}} = \frac{V(\rho - \rho_0)g}{k_{\text{тр}}}.$$

Для сферичних частинок відповідно до закону Стокса

$$k_{\text{тр}} = 6\pi\eta r,$$

тому визначив обсяг V частинки через її радіус r , у результаті отримаємо:

$$u = \frac{2g(\rho - \rho_0)r^2}{9\eta}. \quad (3.8)$$

Рівняння (3.8) показує, що постійна швидкість седиментації частинки пропорційна квадрату її радіусу, різниці густини середовища та частинки, і обернено пропорційна в'язкості середовища. За цим законом відбувається осадження частинок суспензіях, аерозолях, емульсіях. Це ж рівняння показує, що **процесом осадження можна управляти, змінюючи густину і в'язкість середовища**, вплив гравітаційної постійної також можна зробити змінним, використовуючи замість гравітації відцентрове поле (за умови, що $F_{\text{ц}} \gg F_g$).

Спостереження за швидкістю осадження частинок у в'язкому середовищі становить основу седиментаційного аналізу. Аналіз дозволяє

вимірювати розмір частинок та їх розподіл за розмірами у різних дисперсних системах (суспензіях, емульсіях, порошках) [132].

При швидкості осадження u протягом часу τ речовина осяде зі стовпа заввишки $u\tau$ і маса речовини m становитиме:

$$m = \frac{Q}{H} u \tau,$$

де Q – загальна маса дисперсної фази;

H – первісна висота стовпа суспензії;

Q/H – маса дисперсної фази обсягом, що припадає на одиницю висоти стовпа суспензії.

У реальних полідисперсних системах криві осідання (седиментації) мають експоненційний вигляд (рис. 3.1). Результати седиментаційного аналізу представляють як функцій, відбивають розподіл часток за розмірами системі. Зазвичай будують інтегральну та диференціальну криві розподіли. Інтегральна крива – це залежність від радіусу сумарної кількості частинок % з розмірами від $r_{\min}$ до $r_{\max}$. Загальний вигляд таких кривих подано на рис. 3.2. Важливою властивістю інтегральної кривої розподілу є можливість швидкого визначення цієї суспензії будь-якої фракції частинок.

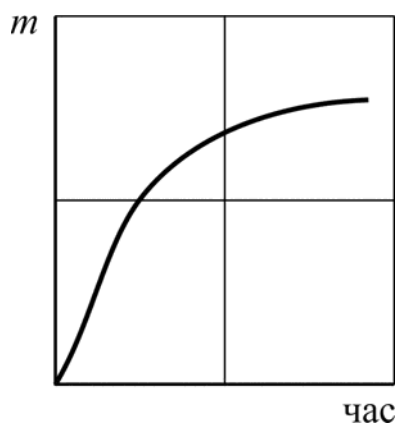


Рис. 3.1. Крива седиментації полідисперсної системи

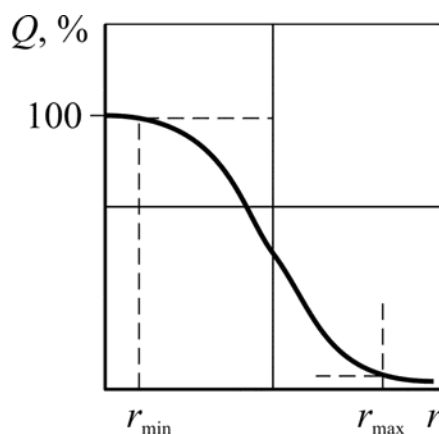


Рис. 3.2. Інтегральна крива розподілу частинок за розмірами

3.3. Аналіз стійкості та коагуляції бурильних суспензій

як дисперсних систем

3.3.1. Загальні питання стійкості та коагуляції дисперсних систем

Проблема стійкості дисперсних систем є однією з найважливіших у колоїдній хімії. Пов'язано це з тим, що і сама стійкість дисперсій та її порушення (коагуляція) мають велике значення у багатьох технологічних процесах. Насамперед проблема стійкості належить до ліофобних вільнодисперсних систем. Такі системи є термодинамічно нестійкими. Втрата ними агрегатної стійкості призводить до коагуляції. Коагуляція в розведених системах супроводжується втратою седиментаційної стійкості, що призводить до розшаровування або поділу фаз. У концентрованих системах коагуляція може виявлятися в утворенні об'ємної (просторової) структури, у якій рівномірно розподілено дисперсійне середовище. До процесу коагуляції відносять також адгезійні взаємодії частинок дисперсної фази з макроповерхнями (адагуляція) [133, 134]. Щоб наочніше уявити основні процеси, які можуть відбуватися в дисперсних системах (до яких належать БС, що перевозяться суднами типу PSV), здійснимо аналіз переходів дисперсних систем у різні стани (рис. 3.3). Стійка вільнодисперсна система є першоосновою БС. Втрата дисперсної системою агрегативної стійкості призводить до коагуляції, перший етап якої полягає у зближенні частинок дисперсної фази та їх взаємної фіксації на невеликих відстанях одна від одної. Між частинками є прошарки середовища. У результаті утворюються або флокули, або коагуляційні структури, що відрізняються рухливістю. Зворотний процес утворення сталої дисперсної системи (зокрема БС) з осаду або гелю (структурованої дисперсної системи) називається пептизацією [135, 136³].

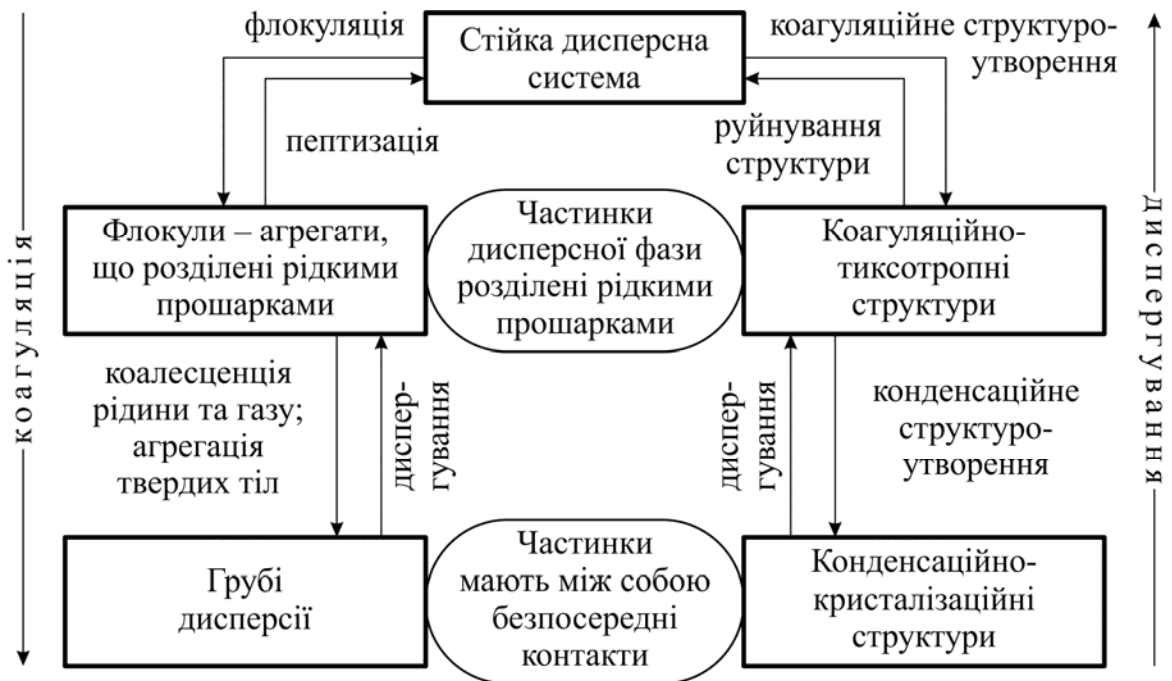


Рис. 3.3. Схема процесів, що відбуваються у дисперсних системах

Більш глибокий процес коагуляції призводить до руйнування прошарків середовища та безпосереднього контакту частинок. У результаті утворюються або жорсткі агрегати з твердих частинок, або їхнє повне злиття у разі рідкої і газоподібної дисперсної фази (коалесценція). У концентрованих системах відбувається утворення жорстких об'ємних конденсаційних структур твердих тіл, перетворити які знову на вільнодисперсну систему можливо лише за допомогою примусового диспергування [137, 138].

Отже, поняття коагуляції містить сукупність процесів, що супроводжуються зменшенням питомої поверхні системи.

3.3.2. Аналіз процесів коагуляції, що відбуваються в бурильних суспензіях

Зміна функціональних характеристик БС (густини, дисперсності, седиментаційної стійкості) пов'язане з процесом коагуляції БС як дисперсної

системи - злиттям дисперсних частинок з утворенням більших агрегатів та їх подальшим осіданням [139].

Дисперсні частинки (лужні з'єднання – KOH , NaOH , Ca(OH)_2 , K_2CO_3 ; солі – KCl , NaCl , CaCl_2 , MgCl_2 ; інгібітори – K_2SO_4 , $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$, Na_2SiO_3 , поліфосфати – $\text{Na}_5\text{P}_3\text{O}_{10}$, $(\text{NaPO}_3)_6$, $\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7$ тощо), якими леговані БС, відчують броунівський рух, тим більш інтенсивний, що менше розмір частинок. Внаслідок випадкових переміщень деякі частинки зближуються на малу відстань одна від одної. На дуже малих відстанях завдяки Ван-дер-Ваальсовської взаємодії частинки інтенсивно притягуються одна до одної. Сили Ван-дер-Ваальса настільки великі, що тепловий рух може порушувати зв'язки, що встановилися, тільки у разі дисперсних частинок найменших ($\sim 10^{-9}$ м) розмірів. Якщо не вжито спеціальних заходів для стабілізації дисперсної системи, кожне зближення частинок на відстань порядку їх розмірів веде до їх злипання, тобто коагуляції. Така коагуляція, коли кожне зближення частинок є ефективним, називається швидкою коагуляцією [140].

Стабілізуючу дію можуть надавати:

1) дифузійні іонні оболонки, що оточують частинки; електростатичне відштовхування іонних оболонок за деяких умов виявляється досить великим для того, щоб запобігти зближенню частинок до відстаней, на яких Ван-дер-Ваальсівське тяжіння починає переважати;

2) захисні оболонки, утворені прошарком структурованої рідини; захисні оболонки створюються деякими речовинами – стабілізаторами і володіють дуже великою в'язкістю, а стосовно короточасних збурень, можливо, і ефективною пружністю;

3) заряди та диполі на поверхні частинок.

Наявність тих чи інших стабілізуючих чинників призводить до того, що тільки частина (іноді незначна, мала) зустрічі частинок виявляється ефективною в сенсі їх злипання. Коагуляція за наявності стабілізуючих чинників називається повільною коагуляцією. Для БС, перевезення яких забезпечується суднами PSV, переважна швидка коагуляція.

3.3.2.1. Коагуляція для статичного стану дисперсної системи

Розглянемо дисперсійне середовище, що містить в одиниці об'єму N_0 кулястих частинок однакового розміру. Число частинок N_0 передбачається досить малим, щоб ймовірність потрійних, четверних тощо зустрічей була дуже малою. Дисперсійне середовище (бурильна суспензія) вважається нерухомим [123].

Для визначення ймовірності зустрічі двох дисперсних частинок внаслідок їхнього броунівського руху скористаємося еквівалентністю броунівського руху та дифузії. Одну з частинок приймемо як нерухому. Провівши навколо цієї частинки сферу радіусу R , вважатимемо, що будь-яка частинка, що входить до цієї сфери, захоплюється і з'єднується з виділеною частинкою. Це означає, що на сферичній поверхні радіусу R концентрація частинок підтримується рівною нулю. Тому поблизу цієї поверхні виникає градієнт концентрації та відповідний йому дифузійний потік частинок. Дифузійний потік на поверхні радіусу R дорівнює середньому числу частинок, що перетинають цю поверхню внаслідок броунівського руху. Ця рівність матиме місце лише за досить малої концентрації дисперсних частинок, коли зустрічі можна вважати попарними. Вочевидь, що у разі невзаємодіючих частинок радіус коагуляції $R=a$, де a – діаметр частинки.

Для знаходження дифузійного потоку розглянемо розподіл частинок, що дифундують до сфери R . Концентрація n цих частинок задовольняє дифузійному рівнянню

$$\frac{\partial n}{\partial t} = D \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial n}{\partial r} \right), \quad (3.8)$$

де D – коефіцієнт броунівської дифузії дисперсних частинок при граничних та початкових умовах

$$\begin{aligned}
n &= n_0 \quad \text{при} \quad r > R, \quad t = 0, \\
n &= 0 \quad \text{при} \quad r = R, \quad t > 0, \\
n &= n_0 \quad \text{при} \quad r \rightarrow \infty.
\end{aligned}
\tag{3.9}$$

Для порядкових оцінок коефіцієнт дифузії можна визначити за відомою формулою Ейнштейна

$$D = \frac{kT}{3\pi\mu a}.$$

Рішенням рівняння (3.8) за умов (3.9) є

$$n = n_0 \left[1 - \frac{R}{r} + \frac{2}{\sqrt{\pi}} \frac{R}{r} \int_0^{\frac{r-R}{2\sqrt{Dt}}} \exp\{-z^2\} dz \right].$$

Потік частинок на сферичній поверхні дорівнює

$$j = D \left(\frac{\partial n}{\partial r} \right)_{r=R} = \frac{Dn_0}{R} \left[1 + \frac{R}{\sqrt{\pi Dt}} \right].$$

Повне число частинок, що перетинають поверхню $r=R$ одиницю часу, тобто повна кількість актів коагуляції в одиницю часу, так само

$$M = \int j dS = D \cdot 4\pi n_0 R \left[1 + \frac{R}{\sqrt{\pi Dt}} \right].$$

Для БС, що транспортуються суднами PSV, процес коагуляції розглядається після такого часу t з його початку, що виконується умова $t \gg \frac{R^2}{D}$. При цьому кількість зустрічей з виділеною часткою за одиницю часу виявляється такою, що дорівнює

$$M = 4\pi D n_0 R.$$

При отриманні виразу кількості зустрічей слід врахувати рух виділеної частинки. У разі однакових частинок облік руху призводить до подвоєння коефіцієнта дифузії. Тоді повна кількість зустрічей в одиниці обсягу в одиницю часу дорівнює

$$M = 8\pi D n_0 R = 4\pi D n_0 a, \quad (3.10)$$

де a – діаметр частинки.

Час коагуляції

$$T = \frac{1}{8\pi D n_0 R}.$$

Таким чином, у разі коагуляції для статичного стану дисперсної системи:

1) коефіцієнти броунівської дифузії частинок дисперсної системи дуже малі порівняно з молекулярними коефіцієнтами дифузії [141];

2) наявність у дисперсних частинок значної маси обумовлює прояв у них інерційних ефектів, які відсутні при суто дифузійних процесах. Важка частинка, зважена в рідині, що рухається, може не слідувати за лінією струму, а залишати її, рухаючись за інерцією по прямій [142].

3.3.2.2. Коагуляція під час ламінарного руху дисперсної системи

Розглянемо БС як дисперсійну систему, що у русі, у якому градієнт швидкості не дорівнює нулю. Прикладом такого руху може бути ламінарна течія БС біля твердої стінки вантажного танка. Наявність градієнта швидкості призводить до зустрічі частинок кінцевих розмірів. Частинка, що знаходиться далі від стінки, рухається з більшою швидкістю, ніж частинка, розташована ближче до стінки. Якщо при цьому відстань між частинками не перевищує суми їх радіусів, частинки можуть зустрітися одна з одною. При кількісному розрахунку кількості зустрічей ми зробимо такі припущення, що спрощують:

1) можна знехтувати впливу взаємної броунівської дифузії частинок на зустріч одна з одною [143];

2) немає гідродинамічної взаємодії між частинками і, зокрема, викликане цією взаємодією викривлення траєкторій, якими відбувається рух частинок [144].

Розглянемо дві частинки радіусами R_1 і R_2 , що знаходяться в ламінарному потоці паралельно стінці (вздовж осі x). Нехай відстань між траєкторіями по перпендикуляру до стінки дорівнює Δy . Вважаючи, завдяки припущенням, рух частинок, що відбувається по прямолінійних траєкторіях, що збігаються з лініями струму, можемо прийняти, що одна з них є нерухомою, а інша рухається відносно першою зі швидкістю $v_x(\Delta y)$, де Δy – відстань між частинками.

За малих значень Δy завжди можна записати

$$v_x(\Delta y) \approx \frac{\partial v_x}{\partial y} \Delta y = \Gamma \Delta y, \quad (3.11)$$

де $\Gamma = \partial v_x / \partial y$ – градієнт швидкості рідини.

Зустріч між частинками можлива, якщо відстань між ними по осі y не перевищує величини

$$\Delta y \leq (R_1 + R_2) \sin \theta.$$

Число зустрічей, що відбуваються за одну секунду, дорівнює кількості частинок, що досягають з усіх боків поверхні сфери радіусу $(R_1 + R_2)$. Воно визначається як

$$\begin{aligned} M &= n_0 \int v_x \cdot 2(R_1 + R_2) \cos \theta d\Delta y = \\ &= 4n_0 \Gamma (R_1 + R_2)^3 \int_0^{\pi/2} \cos^2 \theta \sin \theta d\theta = \frac{4}{3} n_0 \Gamma (R_1 + R_2)^3. \end{aligned}$$

У разі однакових частинок $R=R_1=R_2$ повна кількість зустрічей дорівнює

$$N_{\text{град}} = \frac{32}{3} n_0^2 \Gamma R^3, \quad (3.12)$$

воно зростає пропорційно кубу розмірів частинок, і навіть градієнту швидкості потоку [145].

У даному випадку потік частинок на сферичній поверхні

$$j = D \left(\frac{\partial n}{\partial r} \right)_{r=R} = n_0 \Gamma \left[1 + \frac{R}{\sqrt{\pi D t}} \right].$$

Розрізнявальна риса формули (3.12), отриманої вперше М. Смолуховським, – швидке зростання кількості зустрічей залежно від розміру дисперсних частинок. Відносна коагулююча дія переміщування, порівняно з броунівським рухом, визначається значенням відношення

$$\beta = \frac{N_{\text{град}}}{N_{\text{бр}}} = \frac{4\Gamma a^2}{3\pi D}.$$

де $N_{\text{бр}}$ – число зустрічей, викликаних броунівським рухом, що визначається формулою (3.10);

$N_{\text{град}}$ – число зустрічей у разі наявності градієнта швидкості (для ламінарного потоку БС), що визначається формулою (3.12) [146].

Формулу (3.12) застосовуємо не лише у разі ламінарного потоку рідини, а й усюди, де здійснимо розкладання (3.11), тобто в будь-якому потоці, у якому градієнт швидкості досить малий для того, щоб можна було на відстані діаметра дисперсної частинки вважати швидкість, що змінюється, за лінійним законом (3.11). Зокрема, формулу застосовуємо щодо коагуляції частинок у турбулентному потоці, що рухається вздовж твердої поверхні (зокрема, під час руху БС у системі транспортування).

3.3.2.3. Коагуляція під час турбулентного руху дисперсної системи

Під час турбулентного руху частота зустрічей частинок суттєво збільшується порівняно з числом зустрічей у нерухомому середовищі та в ламінарному потоці. Збільшення кількості зустрічей у турбулентному потоці може бути обумовлено двома незалежними та суттєво різними механізмами. Один з них проявляється лише при значній відмінності у густини дисперсних частинок та середовища. Він проявляється під час турбулентного переміщення газу, що містить аерозоль, і БС може виявлятися тільки у разі випаровування легких фракцій з її поверхні. Другий – загальний механізм коагуляції дисперсних систем при турбулентному переміщенні, який проявляється при коагуляції колоїдів у рідкому середовищі [147].

Розглянемо колоїд у турбулентному потоці рідини й уявимо, що виконані такі припущення:

1) радіус коагуляції частинок R дуже малий порівняно з внутрішнім масштабом турбулентності λ_0 (оскільки розмір колоїдних частинок БС в середньому становить зазвичай $10^{-5} \dots 10^{-6}$ см, а величина λ_0 навіть при дуже енергійному турбулентному русі – близько $10^{-2} \dots 10^{-3}$ см, ця умова фактично виконується завжди [148];

2) має місце повне захоплення колоїдних частинок турбулентними пульсаціями того масштабу, який грає основну роль у механізмі зустрічей завислих частинок [149].

Це припущення з досить добрим ступенем точності виконується у колоїдних частинок БС, оскільки густина речовини колоїдних частинок БС не дуже сильно (у два-три рази) відрізняється від густини рідини [150].

Припустимо, що частинки колоїду зважені в турбулентному потоці із середньою концентрацією (числом частинок в одиниці об'єму) n . Оскільки розмір колоїдних частинок малий порівняно з внутрішнім масштабом турбулентності, можна вважати, що їхнє перенесення здійснюється ізотропною турбулентністю. Колоїдні частинки, що захоплюються турбулентними пульсаціями, хаотично переміщуються за обсягом рідини, так що їхній рух подібний до броунівського руху.

Пульсаційний рух частинок тому можна охарактеризувати деяким турбулентним коефіцієнтом дифузії $D_{\text{турб}}$. Задачу про коагуляцію колоїдних частинок, що переміщуються турбулентними пульсаціями, як і задачу про броунівський рух у нерухомому середовищі, можна звести до певної дифузійної задачі. А саме, можна вважати, що до сфери радіусу R відбувається дифузія частинок, розподіл яких характеризується дифузійним рівнянням

$$\text{div}(D_* \text{grad} n) = 0. \quad (3.13)$$

У (3.13) враховано, що n являє середню концентрацію, після тимчасового усереднення задовольняє стаціонарного рівняння дифузії. означає повний ефективний коефіцієнт дифузії. На великих відстанях дифузія часток здійснюється перенесенням їх турбулентними пульсаціями. Тут є коефіцієнт турбулентної дифузії $D_{\text{турб}}$. На малих відстанях відбувається звичайна броунівська дифузія та зводиться до коефіцієнта броунівської дифузії дисперсних частинок $D_{\text{бр}}$.

Оскільки $D_{\text{турб}}$ – величина, яка залежить від масштабу пульсації і змінюється від точки до точки – також змінна величина.

Граничні умови:

$$n = 0 \quad \text{при} \quad r = R, \quad (3.14)$$

$$n = n_0 \quad \text{при} \quad r \rightarrow \infty. \quad (3.15)$$

Враховуючи, що розв'язання крайового завдання може залежати тільки від радіус-вектора r , можна проінтегрувати рівняння (3.13), написавши

$$D_* r^2 \frac{dn}{dr} = \text{const.}$$

Скориставшись граничними умовами (3.14) та (3.15), а також з огляду на безперервність n на поверхні $r=\lambda_0$ знаходимо:

$$n \approx \frac{n}{1 + \frac{2 R^3}{7 \lambda_0^3}} \left(1 - \frac{R^3}{r^3} \right), \quad r < \lambda_0.$$

Потік частинок на поверхні сфери коагуляції $r=R$ дорівнює

$$j = D_* \left(\frac{\partial n}{\partial r} \right)_{r=R} = D_{\text{турб}} \left(\frac{\partial n}{\partial r} \right)_{r=R} = \frac{3n_0}{1 + \frac{2}{7} \frac{R^3}{\lambda_0^3}} \frac{R^3}{R^4} \beta \sqrt{\frac{\varepsilon_0}{\nu}} R^2 = \frac{3n_0 R \beta}{1 + \frac{2}{7} \frac{R^3}{\lambda_0^3}} \sqrt{\frac{\varepsilon_0}{\nu}}.$$

З достатньою точністю можна записати j у вигляді

$$j = 3n_0 R \beta \sqrt{\frac{\varepsilon_0}{\nu}}. \quad (3.16)$$

Основний дифузійний опір лежить в ділянці $r < \lambda_0$: порівняно великомасштабні пульсації $\lambda > \lambda_0 \gg R$ настільки енергійно розмішують рідину, що забезпечують номерний розподіл колоїдних частинок в обсязі рідини. Повна кількість актів коагуляції за одиницю часу, обумовлених турбулентним перемішуванням або швидкість коагуляції, згідно з формулою (3.16) дорівнює

$$N_{\text{турб}} = 4\pi R^2 j n_0 = 12\pi \beta \sqrt{\frac{\varepsilon_0}{\nu}} R^3 n_0^2. \quad (3.17)$$

Виражаючи ε_0 через швидкість потоку рідини u та масштаб великомасштабних рухів L , можна переписати (3.17) у вигляді

$$N_{\text{турб}} \sim \frac{R^3 n_0^2 u^{3/2}}{\sqrt{\nu L}} \sim R^3 \nu n_0^2 \frac{\text{Re}^{3/2}}{L^2}. \quad (3.18)$$

Формули (3.17) або (3.18) показують, що швидкість коагуляції, як і у разі ламінарного перемішування, пропорційна кубу радіуса коагуляції R . Крім того, $N_{\text{турб}}$ росте з характерною швидкістю потоку як $u^{3/2}$ і порівняно слабо залежить від масштабу великомасштабних пульсацій і в'язкості рідини [151].

Отже, для БС, що є дисперсною системою можна зробити наступні висновки.

Коагуляція дрібніших частинок зумовлена переважно броунівською дифузією. Під час інтенсифікації руху рідини турбулентне перемішування стає відповідальним за коагуляцію все більш дрібних частинок. Швидкість коагуляції зростає зі швидкістю великомасштабних рухів швидше, ніж у ламінарному потоці. Як і в ламінарному потоці, дуже різка залежність $N_{\text{турб}}$ від радіусу частинок призводить до появи латентного періоду.

3.3.3. Аналіз стійкості бурильних суспензій як дисперсних систем

У термодинамічних нестійких дисперсних системах, якими є ліофобні системи, поняття агрегативної стійкості носить кінетичний характер і судити про неї можна за швидкістю процесів, що викликаються надлишком поверхневої енергії [152].

Агрегативна стійкість ліофобних систем відносно коагуляції визначається швидкістю коагуляції, яка, крім інтенсивності броунівського руху та кількості зіткнень, залежить від властивостей поверхневих прошарків, що оточують частинки. За природою цих прошарків та механізму їхньої дії класифікують чинники стійкості. У загальному випадку розрізняють термодинамічні та кінетичні чинники стійкості дисперсних систем.

Термодинамічними є чинники, які забезпечують стійкість дисперсних систем (при збереженні величини поверхні) завдяки зниженню поверхневого натягу та зменшенню ймовірності ефективних зіткнень між частинками (створення потенційних бар'єрів, що уповільнюють або навіть унеможливають процес коагуляції). Кінетичні чинники, що знижують швидкість коагуляції, пов'язані, в основному, з гідродинамічними

властивостями середовища: з уповільненням зближення частинок, витіканням і руйнуванням прошарків середовища між ними.

До термодинамічних чинників стійкості належать такі:

1) електростатичний чинник полягає у зменшенні міжфазного натягу внаслідок виникнення на поверхні частинок подвійного електричного прошарку та електрокінетичного потенціалу. Це може бути пов'язано як із поверхневою електролітичною дисоціацією, так і адсорбцією електролітів. Наявність однойменного заряду у колоїдних частинок перешкоджає їхньому тісному зближенню та злипанню [153];

2) адсорбційно-молекулярний чинник полягає у зменшенні міжфазного натягу через наявність сольватних (гідратних) прошарків на поверхні частинок дисперсної фази. Ці прошарки перешкоджають зближенню колоїдних частинок та їхнього злипання. Механізм відштовхування можна подати як необхідність витрати на руйнування сольватних прошарків і часткову десорбцію молекул при зближенні їхніх частинок. Системи з молекулярно-адсорбційним чинником можуть бути агрегативно стійкими навіть за практичної відсутності електричного потенціалу на поверхні частинок, тому вони менш чутливі до додавання електролітів. Із твердих речовин велику гідрофільність мають оксиди багатьох елементів (наприклад, кремнію, алюмінію, магнію, заліза). Саме ці речовини вводяться до складу БС як легований компонент [154];

3) ентропійний чинник характерний лише для золів, яким притаманний броунівський рух частинок дисперсної фази. При зближенні частинок зростає впорядкованість та зменшується хаотичність, а це відповідно до закону мимовільного зростання ентропії призводить до розштовхування частинок. Ентропійне розштовхування частинок дисперсної фази супроводжується постійною дифузією частинок від місць з великою концентрацією до місць з меншою концентрацією, тобто в системі існує постійне прагнення до вирівнювання концентрацій дисперсної фази. Без ентропійного чинника не може бути рівномірного розподілу частинок за обсягом середовища. Якщо

його немає, то в системі обов'язково відбувається седиментація незалежно від ступеня дії інших чинників [155].

До кінетичних чинників стійкості належать такі:

1) структурно-механічний чинник, який пов'язаний з утворенням на поверхні частинок плівок з речовин-стабілізаторів, що володіють підвищеною пружністю та механічною міцністю, руйнування яких потребує певної енергії та часу. Особливо сильну стабілізуючу дію мають довголанцюгові ПАР (мила різних металів) та ВМС. Характеристики міцності у поверхневих прошарках набуваються завдяки переплетенню радикалів ВМС і довголанцюгових ПАР [156];

2) гідродинамічний чинник визначається швидкістю зближення частинок та витікання прошарків між ними та знижує швидкість коагуляції, завдяки збільшенню в'язкості середовища, зміні густин дисперсної фази та дисперсійного середовища [157].

Для реальних систем (зокрема БС) найхарактерніші змішані чинники. Насправді агрегативна стійкість забезпечується кількома чинниками одночасно. Особливо висока стійкість спостерігається при сукупності термодинамічних та кінетичних чинників, коли поряд зі зниженням міжфазного натягу виявляються структурно-механічні властивості міжчасткових прошарків.

Потрібно мати на увазі, що кожному чиннику стійкості відповідає специфічний спосіб його нейтралізації. Наприклад, електростатичний чинник дуже чутливий до введення електролітів, що знімають подвійний електричний прошарок. Сольватація при адсорбційно-молекулярному чиннику може бути нейтралізована ліофобізацією частинок дисперсної фази за допомогою адсорбції відповідних речовин. Структурно-механічний чинник знижується шляхом використання речовин, що розріджують та розчиняють пружні структуровані шари на поверхні частинок.

Наразі загальної кількісної теорії агрегативної стійкості та коагуляції не існує. Однак є досить розроблена теорія кінетики коагуляції і поширена електростатична теорія стійкості і коагуляції.

3.3.4. Кінетика коагуляції

Коагуляція є характерною властивістю термодинамічно нестійких ліофобних дисперсних систем. Про агрегативну стійкість таких систем судять за швидкістю коагуляції. Швидкість коагуляції в дисперсних системах може бути різною. Деякі системи коагулюють протягом секунд після їх отримання, інші – стійкі протягом доби, місяців, іноді років.

Кількісна теорія кінетики коагуляції була розвинена у працях М. Смолуховського, Г. Мюллера, Н.А. Фукса та інших вчених. Смолуховський розглянув найпростіший випадок: кінетика коагуляції монодисперсного золю зі сферичними частинками, що стикаються між собою під дією броунівського руху. Критична відстань, на якій відбувається взаємодія між частинками, була прийнята приблизно такою, яка дорівнює діаметру частинок, що відповідає безпосередньому їхньому дотику. При цьому будь-яке зіткнення часток обов'язково призведе до їхнього агрегування. Відповідно до Смолуховського під час коагуляції відбуваються лише парні взаємодії, оскільки можливість одночасного зіткнення вже трьох часток дуже мала. Таким чином, стикаються по дві одиночні частинки, утворюючи подвійні, одиночні з подвійними, подвійні один з одним, потрійні з одиночними тощо. [158, 159].

Таке уявлення про процес коагуляції дозволило формально звести його до теорії бімолекулярних хімічних реакцій, відповідно до якої швидкість процесу може бути відображена рівнянням іншого порядку:

$$-\frac{dv_{\Sigma}}{d\tau} = Kv_{\Sigma}^2, \quad (3.19)$$

де v_{Σ} – часткова концентрація чи загальна кількість частинок в одиниці обсягу;

K – константа швидкості коагуляції.

Враховуючи, що константу швидкості коагуляції теоретично визначити важко, існує (згідно з теорією Смолуховського) поняття часу половинної коагуляції θ , при якому кількість частинок при $\tau=\theta$ зменшиться удвічі, тобто $v_0/v_{\Sigma} = 2$. Інтегрування рівняння (3.19) дозволяє отримати вираз для розрахунку загальної кількості частинок та їхньої зміни (зменшення) у процесі коагуляції:

$$v_{\Sigma} = \frac{v_0}{1 + Kv_0\tau}, \quad (3.20)$$

де v_0 – початкове число (первинних) частинок [160].

Відповідно, з рівняння (3.20) випливає:

$$1 + Kv_0\theta = 2, \quad Kv_0 = 1/\theta$$

та

$$v_{\Sigma} = \frac{v_0}{1 + \tau/\theta}.$$

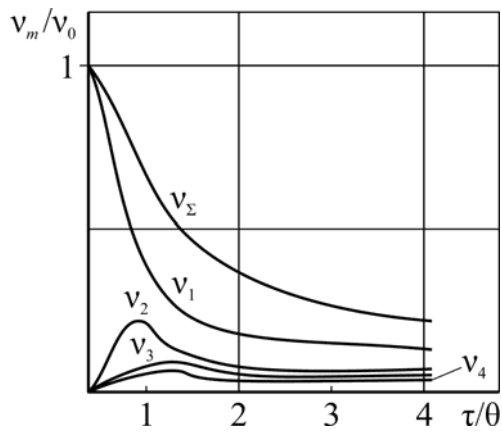


Рис. 3.4. Зміна кількості частинок у часі під час коагуляції за Смолюхівським

Це дозволяє розрахувати зміну кількості частинок у процесі коагуляції. На рис. 3.4 показано залежність числа різних частинок m від часу (m – порядок, тобто число частинок, що з'єдналися в агрегат). Загальна кількість частинок v_Σ та кількість первинних частинок v_1 постійно зменшується. У той самий час число вторинних, третинних тощо частинок спочатку зростає,

досягає максимального значення, а потім зменшується [161].

Використовуючи для розрахунку загальної кількості зіткнень i , відповідно, швидкості зникнення частинок першого закону дифузії Фіка, Смолюхівським було отримано такий вираз:

$$-\frac{dv_\Sigma}{d\tau} = 8\pi DRv_\Sigma^2, \quad (3.21)$$

де D – коефіцієнт дифузії;

R – розмір дисперсної частинки.

Аналіз рівнянь (3.19) та (3.21), показує, що, для того щоб розрахувати число зіткнень частинок, було зручно припустити, що вони призводять до агрегації. Теоретично коагуляції цей випадок отримав назву швидкої коагуляції. У випадку теорії кінетики коагуляції розрізняє швидку і повільну коагуляцію. За аналогією з теорією активних зіткнень вводиться поняття потенційного бар'єру ΔE , для успішного подолання якого, частинки, які стикаються, повинні мати достатній запас енергії. Швидка коагуляція спостерігається тільки тоді, коли енергія зіткнень всіх частинок перевищує цю необхідну для їхнього злипання енергію взаємодії ΔE . Ефективність

зіткнень буде пропорційна теорії Больцмана. Рівняння швидкості коагуляції має вигляд:

$$-\frac{dv_{\Sigma}}{d\tau} = 8\pi DRPe^{\frac{\Delta E}{kT}} v_{\Sigma}^2, \quad (3.22)$$

де P – стеричний множник, що враховує сприятливі просторові розташування частинок під час зіткнення, їхню форму, розміри [162].

Аналіз рівнянь (3.19) та (3.22) дозволяє отримати вираз для константи швидкості коагуляції K :

$$K = 8\pi DRPe^{\frac{\Delta E}{kT}}. \quad (3.23)$$

Рівняння константи швидкості коагуляції (3.23) зручне для класифікації процесів коагуляції (швидка та повільна). Що стосується швидкої коагуляції всі зіткнення частинок ефективні, тобто призводять до злипання частинок. Це відповідає умові, коли величина потенційного бар'єру при зіткненні частинок дорівнює нулю ($\Delta E=0$), а величина стеричного множника дорівнює одиниці ($P=1$). Константа швидкості швидкої коагуляції:

$$K_6 = 8\pi DR.$$

Якщо врахувати, що для сферичних частинок $R=2r$ та $D = \frac{kT}{6\pi\eta r}$, то вираз для константи швидкої коагуляції набуде вигляду:

$$K_6 = \frac{8kT}{3\eta},$$

а час половинної коагуляції, враховуючи (3.19), дорівнює:

$$\theta_6 = \frac{4\eta}{8kTv_0}.$$

З отриманих співвідношень випливає, що з швидкої коагуляції константа швидкості залежить від температури T і в'язкості середовища η .

В'язкість рідин (зокрема і технічних, і навіть БС) зі зростанням температури, зазвичай, падає, що зумовлює цим різку залежність константи швидкості коагуляції від температури. Крім цього, час половинної коагуляції зменшується зі зростанням концентрації дисперсної системи v_0 . Таким чином, агрегативна стійкість дисперсних систем збільшується зі зростанням в'язкості, зниженням температури та концентрації дисперсної фази [163, 164].

Що стосується повільної коагуляції в повному обсязі зіткнення частинок виявляються ефективними, тобто призводять до їхнього злипання. Це може бути пов'язано як з нездатністю частинок подолати потенційний бар'єр, так і необхідністю їхнього певного просторового розташування при зіткненні, $\Delta E > 0$ і $P < 1$. Константа швидкості повільної коагуляції виражається рівнянням (3.23), яке можна подати так:

$$K_m = K_6 Pe^{\frac{\Delta E}{kT}} \quad (3.24)$$

або

$$K_m = \frac{8kT}{3\eta} Pe^{\frac{\Delta E}{kT}}.$$

Відповідно до досліджень Н.А. Фукса, існує зв'язок ефективності зіткнень з потенційним бар'єром при коагуляції. Якщо $\Delta E \gg kT$ (енергія

теплого руху), швидкість коагуляції може наблизитися до нуля і система виявиться агрегативно стійкою. У теорії, розвиненою Фуксом, вводиться поняття про коефіцієнт уповільнення W , який показує, у скільки разів зменшується константа швидкості швидкої коагуляції:

$$K_m = \frac{K_6}{W}.$$

З огляду на співвідношення (3.24) можна записати, що

$$W = \frac{1}{P} e^{\frac{\Delta E}{kT}}.$$

Цей коефіцієнт іноді називають чинником стійкості чи коефіцієнтом стабільності. Мюллер, впродовж теорії Смолуховського, розвинув теорію швидкої коагуляції полідисперсних золів. Її основний висновок (підтверджений експериментально) у тому, що полідисперсні системи коагулюють швидше, ніж монодисперсні. Великі частинки виступають у ролі «зародків»; у їхній присутності маленькі частинки зникають швидше, ніж у відсутності. Теорія Мюллера пояснила також деяке збільшення швидкості коагуляції монодисперсних золів внаслідок збільшення полідисперсності в часі.

3.3.5. Теорія агрегативної стійкості дисперсних систем

Агрегативна стійкість дисперсних систем описується різними теоріями. Найбільш визнаною є теорія Б.В. Дерягіна – Л.Д. Ландау – Е. Фервея – Дж.Т. Овербека, яка враховує електростатичну складову розклинювального

тиску і міжмолекулярні сили тяжіння частинок. Ця теорія задовільно визначає закономірності поведінки дисперсних систем, у яких можна знехтувати молекулярно-адсорбційним чинником стійкості. Теорія ДЛФО розглядає спільну дію сил тяжіння (сили Ван-дер-Ваальса) та електростатичних сил відштовхування (взаємодія подвійних електричних прошарків) [165].

За поданням Дерягіна під час зближення частинок, розділених рідким прошарком, виникає «розклинювальний тиск», який залежно від співвідношення сил тяжіння та відштовхування перешкоджає виникненню безпосереднього контакту між частинками (позитивний тиск) або, навпаки, сприяє їхньому контакту та коагуляції (негативний тиск). Експеримент підтвердив існування розклинювального тиску. Його можна розглядати як різницю гідростатичних тисків у плівці та в навколишній її рідині, обумовлених різним енергетичним станом молекул рідини безпосередньо поблизу поверхні частинок і далеко від неї, у вільному обсязі. Загальна енергія взаємодії між двома частинками дорівнює:

$$U = U_e + U_m,$$

де U_e – енергія відштовхування; U_m – енергія тяжіння.

Відповідно до теорії ДЛФО ці підсумкові співвідношення визначають поведінку дисперсних систем. Їхня стійкість або швидкість коагуляції залежать від знака і величини загальної потенційної енергії взаємодії частинок. Позитивна енергія відштовхування $U_e(h)$ зі збільшенням відстані зменшується за експоненціальним законом, а негативна енергія тяжіння $U_m(h)$ обернено пропорційна квадрату відстані (рис. 3.5).

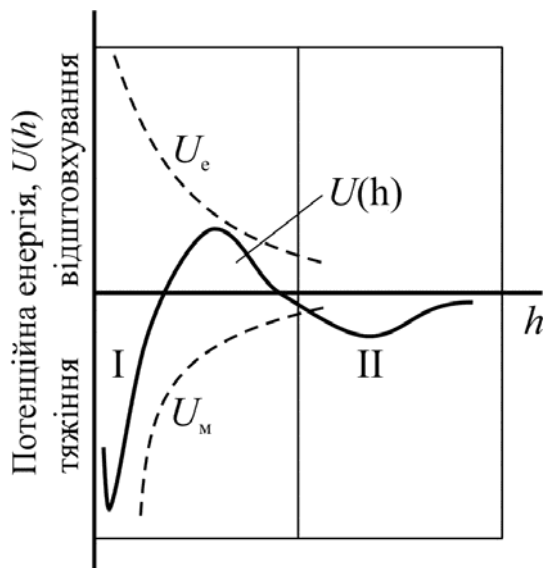


Рис. 3.5. Потенційні криві взаємодії частинок

У результаті їх підсумовування виходить немонотонна залежність, що надана на рис. 3.5 суцільною лінією $U(h)$. Дана крива має три характерні ділянки, що мають таке пояснення.

Первинний мінімум I на малих відстанях між частинками відповідає їхньому безпосередньому злиттю або злипанню (рис. 3.5, I); вторинний мінімум II – їх тяжінню через прошарок середовища (рис. 3.5, II).

Наявність цього мінімуму пов'язують із явищем тиксотропії, тобто здатністю багатьох золів зворотно перетворюватися на гелі. Максимум на проміжних відстанях характеризує потенційний бар'єр, що перешкоджає злипанню частинок.

Розглянутий спрощений варіант теорії ДЛФО не враховує розмірів частинок та їх форму.

Електростатична теорія застосовується до систем, у яких стійкість забезпечується лише електростатичним чинником. У реальних системах спостерігається, у разі, переважання того чи іншого чинника стійкості. У той самий час електростатичний чинник дуже поширений, особливо у вуглеводневих дисперсних системах, створюють умови для дисоціації. Механізми його утворення ті ж, що й для подвійного електричного шару: поверхнева дисоціація речовини частинок, адсорбція електролітів (також іоногенних ПАР та ВМС) та орієнтування диполів молекул розчинених речовин [166, 167].

3.4. Дослідження латентної зміни реологічних характеристик бурильних суспензій в умовах їх збереження та транспортування морськими спеціалізованими суднами

3.4.1. Технологія і послідовність виконання експериментів

Транспортування БС суднами типу PSV здійснюється у вантажних трюмах, глибина яких становить 2,5...3,5 м. Час транспортування БС від порту до нафтової платформи становить 2...5 днів. Крім того, можливі випадки, коли деякі експлуатаційні та технологічні причини спричиняють необхідність дрейфу або стоянки біля НДП [168, 169]. Цей часовий проміжок сприяє поступовому осадженню важких компонентів, якими леговані БС, і збільшує стратифікацію густини БС по глибині вантажного танка, де вона знаходиться [170, 171].

З метою дослідження латентної зміни реологічних характеристик БС під час їх транспортування суднами типу PSV, виконувався моніторинг густини БС за різною глибиною вантажного танка.

Експеримент виконувався у системі транспортування БС морського судна PSV дедвейтом 5850 тонн [172]. Фрагмент принципової схеми розташування вантажних танків судна, у якому проводилися дослідження, наведено на рис. 3.6. Конструкція судна передбачала приймання та транспортування бурильної суспензії у чотирьох вантажних танках 1, 2, 5, 6, попарно розташованих на лівому та правому борту судна. Прийом /викачування бурильної суспензії здійснювався насосами 3, 4 магістралями 7, 8. Відмінність габаритних розмірів вантажних танків (довжини, ширини та глибини) один від одного не перевищувала 0,1 %. Також практично однаковою була об'ємна кількість БС, яка в них транспортувалася.

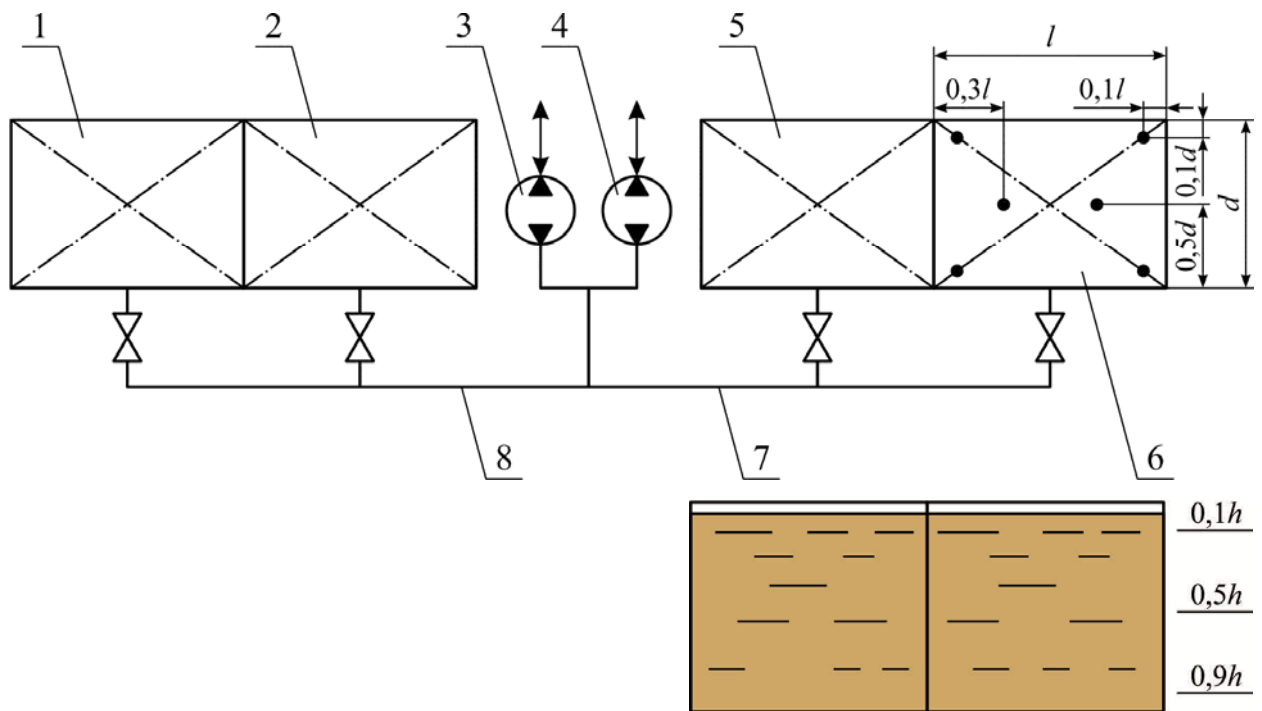


Рис. 3.6. Принципова схема розташування вантажних танків судна типу PSV дедвейтом 5850 тонн, призначених для транспортування БС (фрагмент) та технологія проведення вимірювань:

1, 2, 5, 6 – вантажні танки; 3, 4 – вантажні насоси; 7, 8 – магістралі прийому / видачування БС

Проби визначення густини БС відбиралися у різних точках вантажного танка, відповідних 10-ти, 50-ти і 90 % його глибини. На кожному з рівнів виконувалося по шість вимірів відповідно до технології, наведеної на рис. 3.6 (на рис. 3.6 показано вимір густини БС тільки для вантажного танка 6, аналогічні вимірювання проводилися у вантажних танках 1, 2, 5). Отримані в такий спосіб значення густини усереднювалися. Також усереднювалися значення густини на рівні (на однаковій глибині $0,1h$, $0,5h$, $0,9h$) в попарно розташованих з кожного борту судна танках. Цикл вимірювань густини для всіх точок та всіх танків не перевищував 10 хв.

3.4.2. Метрологічне забезпечення досліджень

Для вимірювання густини використовувався автоматичний ареометр Anton Paar DMA35 Tag&Log компанії LEMIS Baltic (Латвія-Німеччина), що дозволяє визначати абсолютну та відносну густину рідин (зокрема агресивних у відібраній пробі) в діапазоні $650 \dots 1830 \text{ кг/м}^3$ з точністю вимірювання $\pm 1 \text{ кг/м}^3$ при одночасному контролі температури вимірюваних зразків. Ареометр відповідає стандартам ASTM D 7777 (American Standard Test Method for Density, Relative Density) та IP 559 (IP 559: Determination of density of middle distillate fuels) та долучений до Державного реєстру засобів вимірювальної техніки України. Принцип дії ареометра заснований на вимірі періоду резонансної частоти механічних коливань чутливого елемента у вигляді U-подібної трубки із борсилікатного скла, заповненої зразком випробуваної рідини. Основні характеристики ареометра Anton Paar DMA35 Tag&Log наведено у таблиці 3.1.

Таблиця 3.1

Технічні характеристики ареометра Anton Paar DMA35 Tag&Log

Характеристики	Опис
Діапазон вимірювань густини, кг/м^3	650...1750
Межі абсолютної похибки, що допускається в діапазоні робочих температур, кг/м^3	± 1
Діапазон вимірювань температури, $^{\circ}\text{C}$	0...+40
Межі абсолютної похибки вимірювань температури, що допускається, $^{\circ}\text{C}$	$\pm 0,2$
Об'єм пам'яті, вимірювань	1024
Інтерфейс	ІЧ-порт IrOBEX/IrLPT
Довжина занурювального зонда, м	до 4,8

Потужність, що споживається вантажними насосами (позиції 3, 4 на рис. 3.6), а також витрата БС, що перекачується з вантажних танків (позиції 1, 2, 5, 6 на рис. 3.6), визначалися судовими вимірювальними приладами, встановленими на посту управління та в системі транспортування БС.

3.4.3. Результати досліджень

Під час виконання експериментів судно PSV транспортувало на НВП БС із такими характеристиками:

- найменування та марка – Rheliant barite OBM (виробник MiSWACO, Houston, USA);
- густина при 15°C – 1185 кг/м³;
- базовий компонент – вуглеводні, C₁₁–C₁₄, h-алкани, iso-алкани – 57...60 %; мастила (нафтові) C₂₀–C₅₀, на основі дистилятних масил – 22...25 %;
- леговані добавки – Mg (1,3...1,4 %), Ca (3,2...3,5 %), Cu (0,1...0,2 %), Si (6,2...6,4 %).

Дослідження виконувались при постійних зовнішніх збуреннях (зокрема, під час хитавиці моря менше 3 балів за 12-ти бальною шкалою) під час руху судна та очікування підходу до НВП [173]. Морський перехід PSV відбувався без зміни стійкості, при стабільному крені та диференту, тому висота рівня БС у вантажному танку вважалася постійною [174]. Зміна температури БС під час її транспортування не перевищувала $\pm 1^\circ\text{C}$, що не впливало на коефіцієнт лінійного розширення та не призводило до збільшення її обсягу у вантажному танку. Експеримент проводився протягом 48 годин, інтервал між вимірюваннями густини БС становив 6 годин. Результати експерименту наведено у таблиці 3.2.

Таблиця 3.2

Густина бурильної суспензії, ρ , кг/м³

Час транспортування, години	Глибина вантажного танку		
	$0,1h$	$0,5h$	$0,9h$
0	1185	1185	1187
6	1182	1198	1212
12	1172	1225	1258
18	1160	1241	1298
24	1151	1258	1335
30	1136	1283	1358
36	1118	1316	1381
42	1101	1326	1402
48	1092	1342	1418

Отримані значення густини БС на різних рівнях вантажного танка $0,1h...0,9h$ підтверджують латентне розшарування БС, яке виникає під час транспортування її на суднах типу PSV. Графічні залежності, що відображають зміну густини БС під час її транспортування, наведені на рис. 3.7.

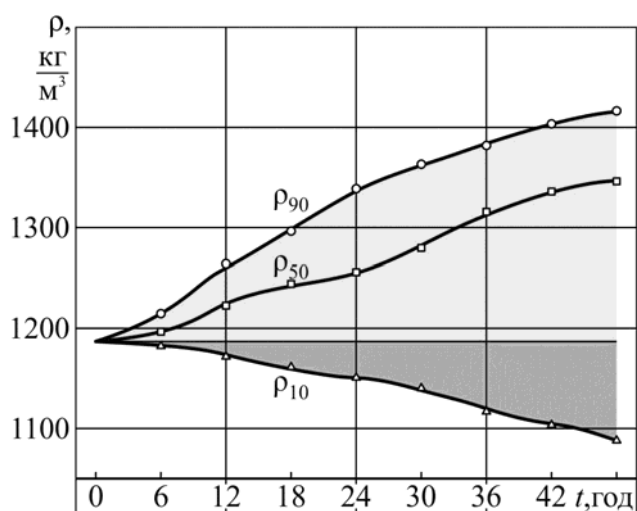


Рис. 3.7. Зміна густини, ρ , БС суспензії в залежності від часу її транспортування, t , на судні типу PSV дедвейтом 5850 тонн

Площа під кривими $\rho=f(t)$ характеризує зміну густини БС. Збільшення площі під кривими $\rho_{90}=f(t)$ та $\rho_{50}=f(t)$ відповідає збільшенню густини та утворенню осаду з важких компонентів, якими легована БС, в нижній та середній частині вантажного танка. Збільшення площі під кривою $\rho_{10}=f(t)$ відповідає зниженню густини та утворенню рідкої фази у верхній частині та на поверхні вантажного танка.

Рівень стратифікації густини БС по глибині вантажного танка можна оцінити за номограмами, що побудовані за даними табл. 3.2 та наведені на рис. 3.8. Висоти стовпчиків 1 та 2 відповідають густині БС в різний час її знаходження у вантажному танку. При цьому, що більша різниця у висоті стовпчиків 1 (які відповідають густині на глибині 10 % від поверхні танка) та 2 (які відповідають густині на глибині 90 % від поверхні танка), тим більше розшарування БС.

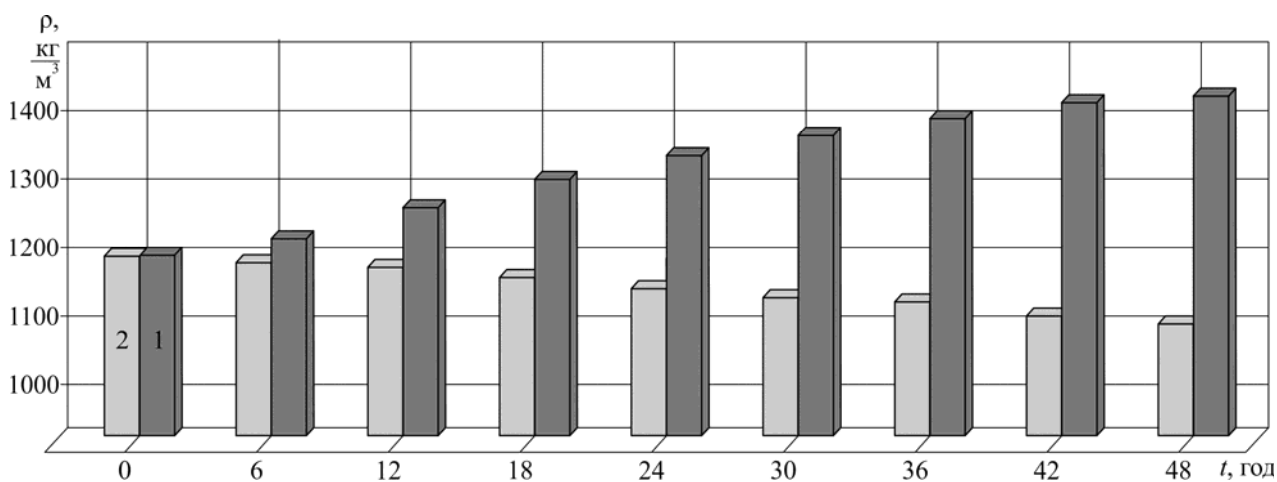


Рис. 3.8. Зміна густини, ρ , БС в залежності від часу її транспортування на судні типу PSV дедвейтом 5850 тонн:

1 – на глибині 90 %, 2 – на глибині 10 %

Таким чином, **густина є кількісним показником зміни реологічних характеристик БС під час їхнього транспортування суднами типу PSV.**

Для подальших досліджень якісною характеристикою, за якою можна оцінити латентну зміну реологічних властивостей БС, приймалася її седиментаційна стійкість

$$\Delta\rho = \frac{\rho_{\max} - \rho_{\min}}{\rho_{\max}} 100\%,$$

де $\rho_{\max}$, $\rho_{\min}$ – максимальне та мінімальне значення густини БС, кг/м³.

Великі значення $\Delta\rho$ відповідають збільшенню кількості осаду важких легованих елементів, більш високому ступеню розшарування БС та зниженню її седиментаційної стійкості.

Для значень густини БС, наведених у таблиці 3.2, значення седиментаційної стійкості можуть бути розраховані за виразом

$$\Delta\rho = \frac{\rho_{90} - \rho_{10}}{\rho_{90}} \cdot 100\%,$$

де ρ_{90} , ρ_{10} – густина бурильної суспензії на рівнях 0,9h та 0,1h відповідно (рис. 3.6). У такому разі отримаємо значення, що наведені в таблиці 3.3.

Таблиця 3.3

Седиментаційна стійкість бурильної суспензії

Час транспортування, години	Седиментаційна стійкість БС, $\Delta\rho$, %
0	0,17
6	2,54
12	7,34
18	11,89
24	15,99
30	19,54
36	23,52
42	27,34
48	29,85

За результатами таблиці 3.3 побудовано залежність $\Delta\rho=f(t)$, що показана на рис. 3.9.

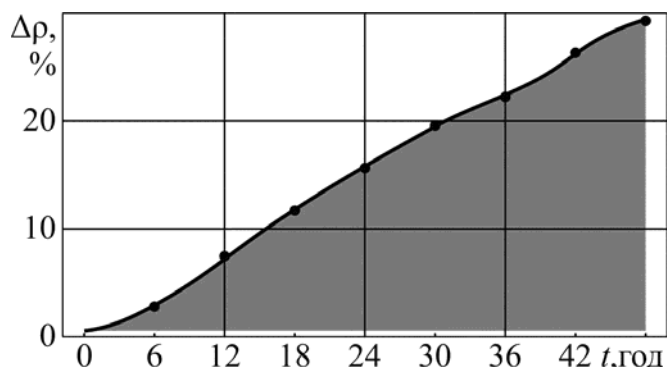


Рис. 3.9. Залежність седиментаційної стійкості БС, $\Delta\rho$, від часу її транспортування, t , на судні типу PSV дедвейтом 5850 тонн

Збільшення площі під кривою $\Delta\rho=f(t)$ відповідає розшаруванню бурильної суспензії та зменшенню її седиментаційної стійкості. Безпосередньо седиментаційної стійкості є **якісним показником зміни реологічних характеристик БС** під час їх транспортування суднами типу PSV.

Отже, площа під кривими $\rho=f(t)$ та $\Delta\rho=f(t)$ може бути прийнята як **критерій якісної та кількісної зміни реологічних характеристик БС** під час їхнього зберігання та транспортування суднами типу PSV.

Для розширення масиву отриманих результатів, а також їхнього підтвердження для БС з різними характеристиками, суден різної водотоннажності та різного часу транспортування БС аналогічні експериментальні дослідження виконувались на судні типу PSV дедвейтом 5650 тонн, яке здійснювало 2...2,5-денні переходи від порту до бурової платформи з можливим очікуванням безпосереднього підходу до платформи протягом 1...1,5 днів [175].

Основні характеристики бурильної суспензії, що перевозиться на бурову платформу:

- найменування та марка – IRG-Bour 715KK;

- густина при 15°C – 1295 кг/м³;
- базовий компонент – мінеральне мастило Energol 415CL;
- леговані добавки – Mg (1,6...1,8 %), Ca (3,3...3,8 %), Cu (0,1...0,2 %), Si (6,2...6,4 %).

Час переходу судна PSV від порту до моменту видачі бурильної суспензії на бурову платформу (в режимі економічного ходу судна [176, 177]) становив 52 години, що давало можливість здійснювати відбір проб БС для всіх умов експерименту протягом 48 годин з проміжком між вимірюваннями густини 6 годин.

Результати досліджень наведені у таблицях 3.4, 3.5 та відображені на рис. 3.10.

Таблиця 3.4

Густина бурильної суспензії, ρ , кг/м³

Час транспортування, години	Глибина вантажного танку		
	0,1h	0,5h	0,9h
0	1295	1295	1298
6	1292	1298	1329
12	1278	1325	1378
18	1265	1342	1396
24	1242	1362	1419
30	1228	1385	1438
36	1207	1402	1468
42	1182	1419	1488
48	1163	1447	1524

Таблиця 3.5

Седиментаційна стійкість бурильної суспензії

Час транспортування, години	Седиментаційна стійкість БС, $\Delta\rho$, %
0	0,23
6	2,86
12	7,82
18	10,36
24	14,25
30	17,10
36	21,62
42	25,89
48	31,04

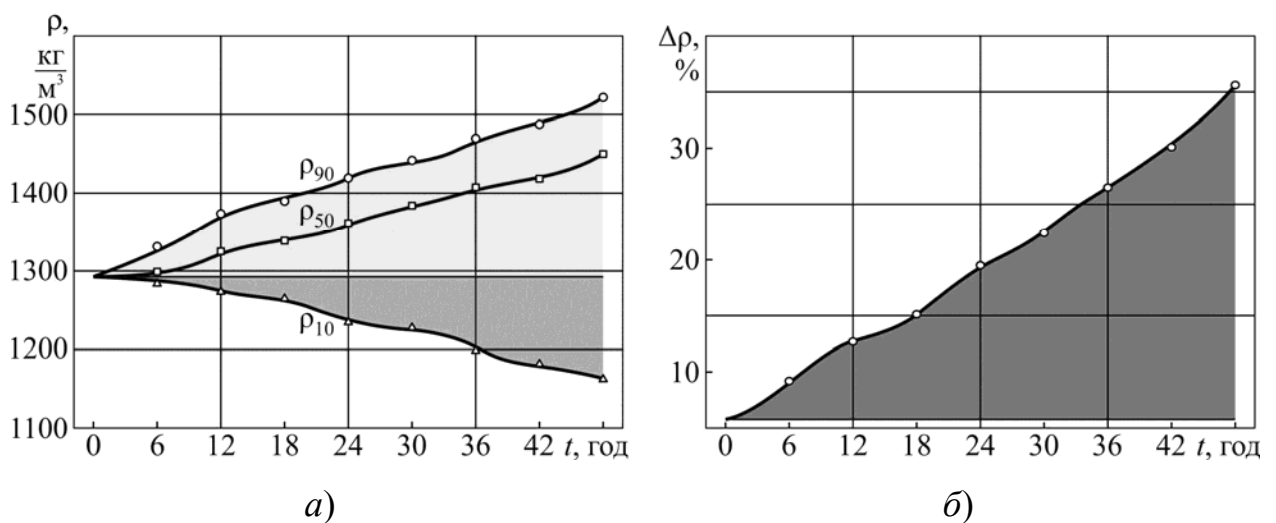


Рис. 3.10. Зміна густини (а) та седиментаційної стійкості (б) БС для різного часу її транспортування на судні PSV дедвейтом 5850 тонн

Для більшої візуалізації на рис. 3.11 отримані результати представлені у вигляді номограми, що відображає зміну густини БС під час її транспортування на судні PSV дедвейтом 5850 тонн. У цьому висота стовпчиків номограми відповідає густині БС різної глибини вантажного танка (10 і 90 %), а різниця у висоті стовпчиків – зміні седиментаційної стійкості БС.

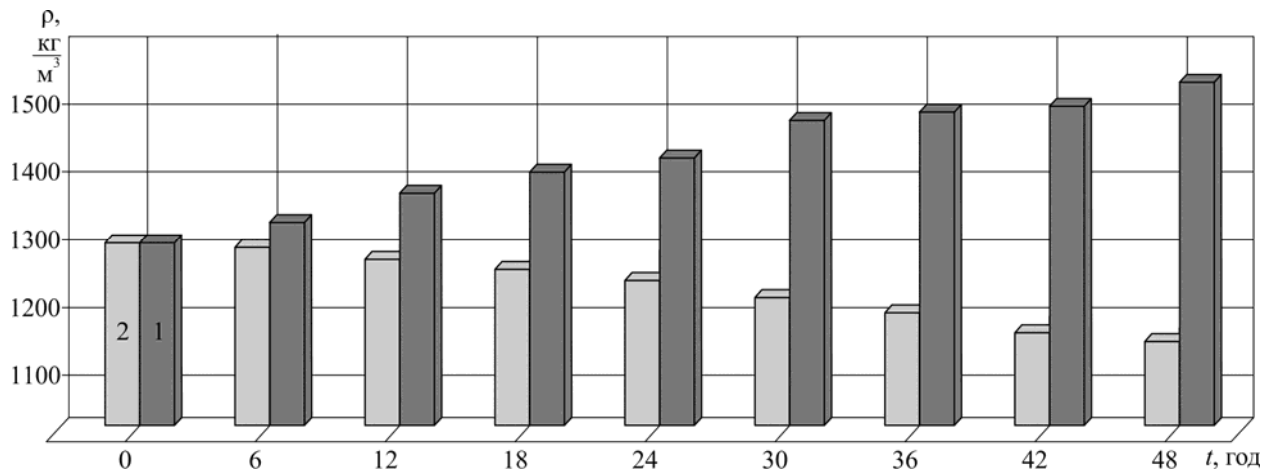


Рис. 3.11. Зміна густини бурильної суспензії залежно від часу:

1 – глибина $0,9h$; 2 – глибина $0,1h$

Аналогічний цикл вимірювань виконувався у системі транспортування БС судна PSV дедвейтом 4630 тонн [95]. При цьому визначення густини БС під час транспортування здійснювався відповідно до схеми, що наведена на рис. 3.12 [2, 178].

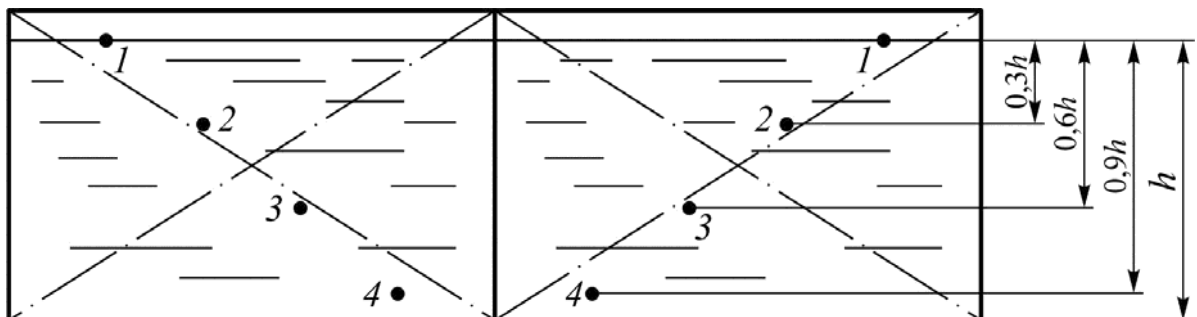


Рис. 3.12. Контроль густини БС у різних точках вантажного танка судна

PSV дедвейтом 4630 тонн

Моніторинг густини БС здійснювався шляхом вимірювання її значення в різних точках вантажного танка (точки 1, 2, 3, 4 на рис. 3.12). При цьому густина БС в точці 1 відповідає густині на поверхні, у точці 2 – на рівні 30 % від загальної висоти стовпа рідини – $0,3h$, у точці 3 – на рівні – $0,6h$, у точці 4 – на рівні – $0,9h$.

Структурний склад БС (за відсотковим складом вуглеводневих компонентів та легованих речовин) принципово не відрізнявся від структурного складу БС, з якими проводилися попередні дослідження. Густина БС відповідно до паспортних характеристик становила 1240 кг/м³. Вимірювання густини виконувались у наступному інтервалі часу: 6, 12, 18, 24 години. Усереднені результати виміру в однакових точках двох однотипних вантажних танках наведено в таблиці 3.6.

Таблиця 3.6

Зміна реологічних характеристик БС під час її транспортування на судні PSV дедвейтом 4630 тонн

Час, години	Густина, ρ , кг/м ³ , на глибині танка				Седиментаційна стійкість, $\Delta\rho$, %
	на поверхні	0,3h	0,6h	0,9h	
0	1240	1240	1246	1250	0,81
6	1185	1252	1265	1294	8,42
12	1108	1235	1282	1324	16,31
18	1043	1173	1312	1386	24,75
24	982	1065	1376	1453	32,42

За результатами, що наведені в таблиці 3.6, побудовані номограми, що відображають зміну густини БС на різній глибині вантажного танка та різного часу транспортування (рис. 3.13).

Седиментаційна стійкість БС для даного варіанта може бути визначена за виразом

$$\Delta\rho = \frac{\rho_{90} - \rho_0}{\rho_{90}} \cdot 100\%,$$

де ρ_{90} , ρ_0 – густина бурильної суспензії на рівні, що відповідає 90 % глибини вантажного танка та на поверхні вантажного танка, кг/м³ (рис. 3.12).

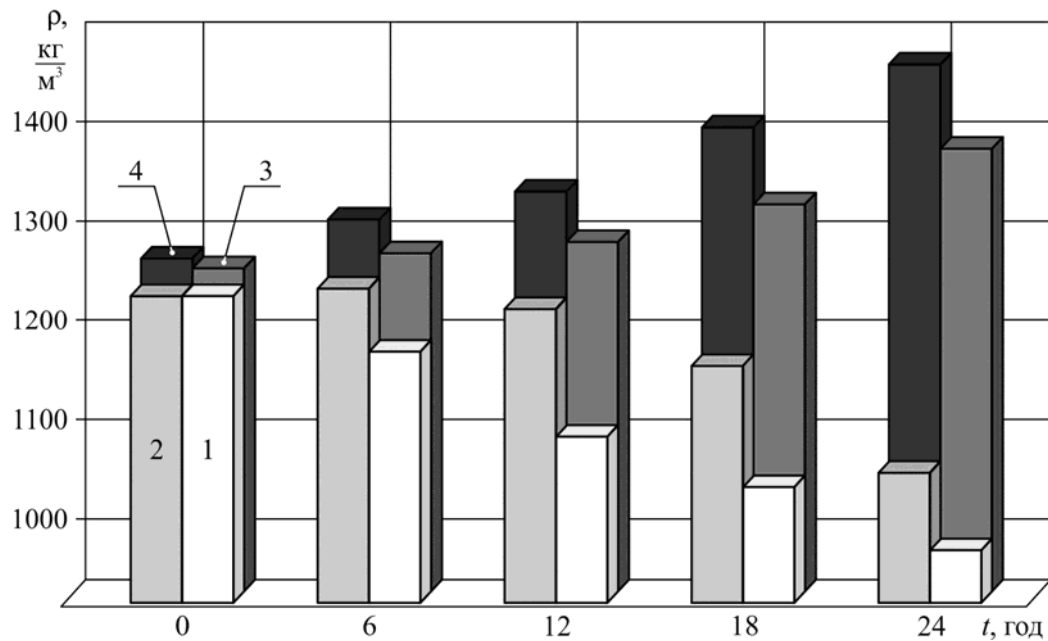


Рис. 3.13. Густина бурильної суспензії на різній глибині вантажного танка під час її транспортування на судні PSV дедвейтом 4630 тонн:

1 – на поверхні танка; 2 – на глибині 30 %; 3 – на глибині 60 %;
4 – на глибині 90 %

У такому разі отримаємо значення седиментаційної стійкості БС, що наведені в таблиці 3.6. Отримані результати відображені як залежність $\Delta\rho=f(t)$ – рис. 3.14.

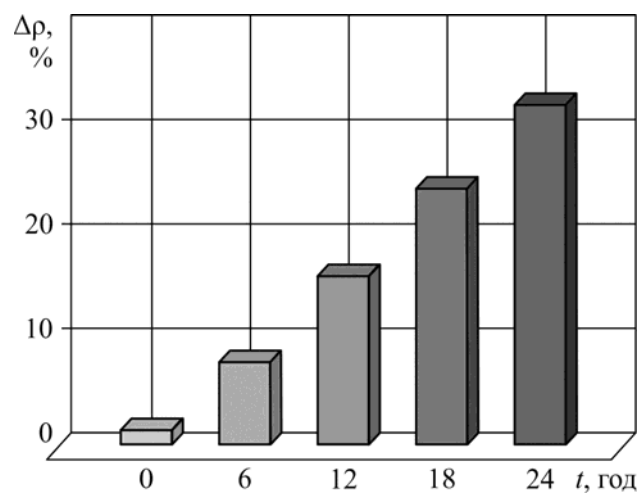


Рис. 3.14. Зміна седиментаційної стійкості БС під час її транспортування на судні PSV дедвейтом 4630 тонн

Аналіз зміни реологічних характеристик БС за глибиною вантажного танка під час її транспортування проводився на цьому ж судні для БС з іншими характеристиками. Його результати наведені у таблицях 3.7, 3.8 [178, 179].

Таблиця 3.7

Зміна реологічних характеристик БС під час її транспортування на судні PSV
дедвейтом 4630 тонн

Час, години	Густина, ρ , кг/м ³ , на глибині танка				Седиментаційна стійкість, $\Delta\rho$, %
	на поверхні	0,3h	0,6h	0,9h	
0	1323	1330	1355	1373	3,61
6	1234	1280	1386	1417	12,91
12	1127	1187	1476	1520	25,86
18	1087	1123	1506	1561	30,37
24	1026	1043	1602	1676	38,78

Таблиця 3.8

Зміна реологічних характеристик БС під час транспортування на судні PSV
дедвейтом 4630 тонн

Час, години	Густина, ρ , кг/м ³ , на глибині танка				Седиментаційна стійкість, $\Delta\rho$, %
	на поверхні	0,3h	0,6h	0,9h	
0	1268	1270	1270	1272	0,3
6	1245	1262	1315	1350	7,78
12	1175	1254	1347	1388	18,13
18	1126	1213	1388	1433	21,42
24	1062	1187	1458	1513	29,81

За результатами, наведеними в таблиці 3.7, побудовані номограми, що відображають зміну густини БС у часі в різних за глибиною танках точках вимірювання (рис. 3.15), а також седиментаційної стійкості БС (рис. 3.16).

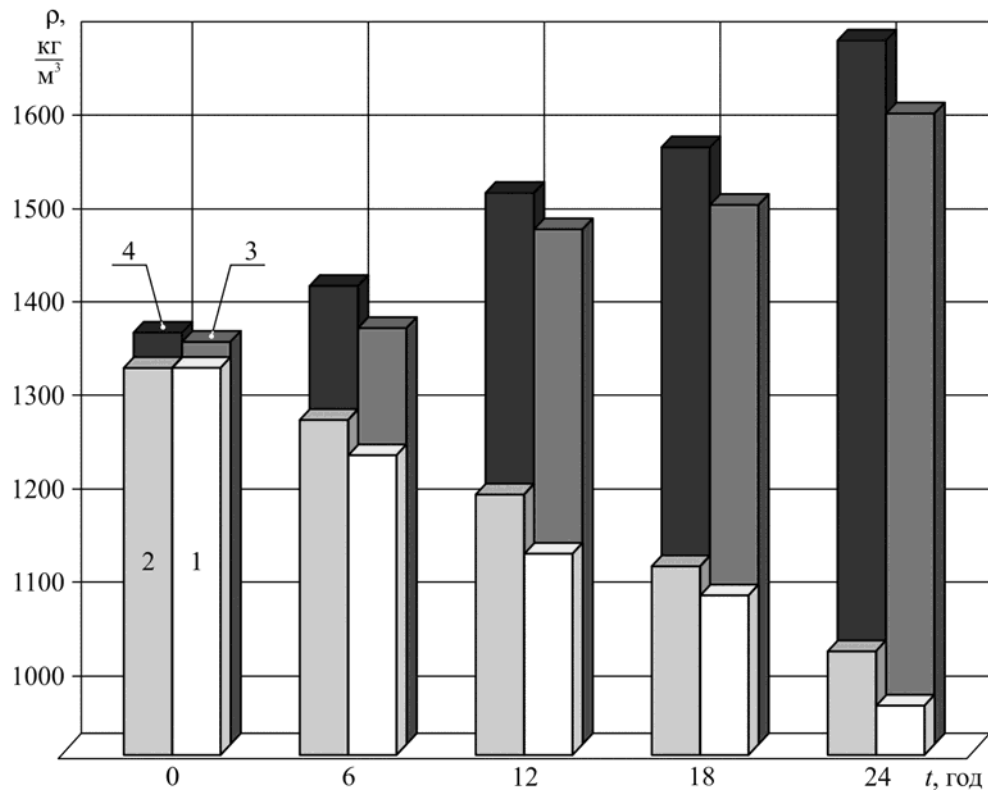


Рис. 3.15. Зміна густини БС залежно від часу її транспортування судном PSV дедвейтом 4630 тонн:

1 – на поверхні танка; 2 – на глибині 30%; 3 – на глибині 60%;
4 – на глибині 90 %

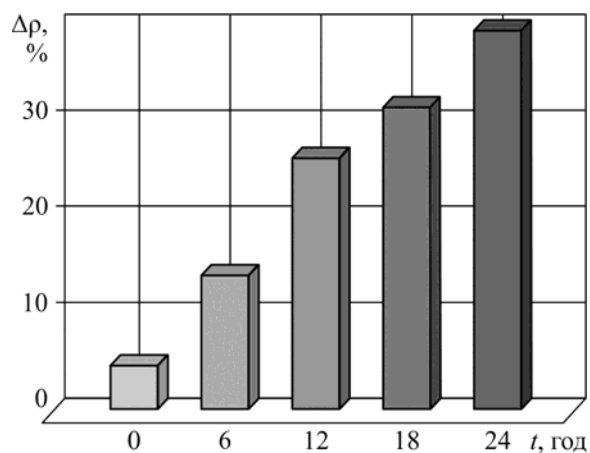


Рис. 3.16. Зміна седиментаційної стійкості БС для різного часу її транспортування судном PSV дедвейтом 4630 тонн

За результатами, наведеними в таблиці 3.8, побудовані номограми, що відображають зміну густини БС у часі в різних за глибиною танках точках вимірювання (рис. 3.17), а також седиментаційної стійкості БС (рис. 3.18).

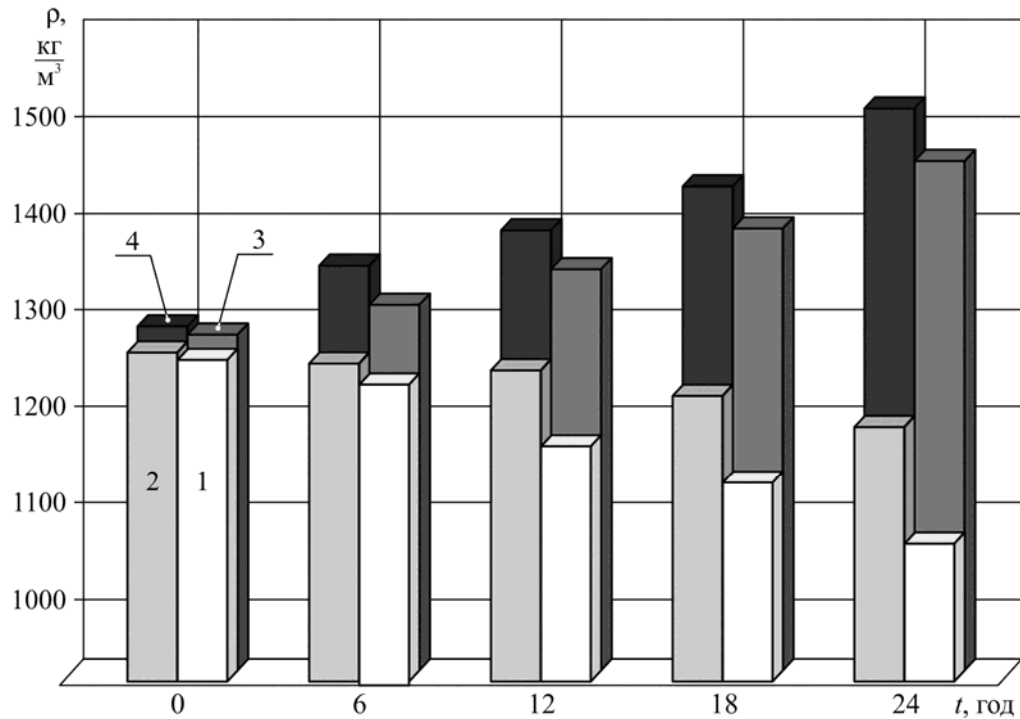


Рис. 3.17. Зміна густини БС залежно від часу її транспортування судном PSV дедвейтом 4630 тонн:

1 – на поверхні танка; 2 – на глибині 30%; 3 – на глибині 60%;
4 – на глибині 90 %

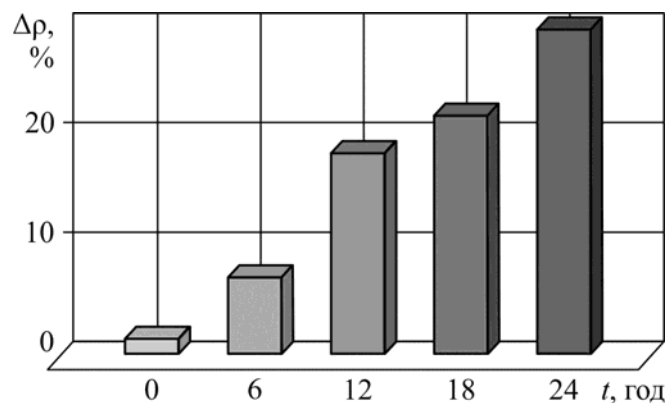


Рис. 3.18. Зміна седиментаційної стійкості БС для різного часу транспортування судном PSV дедвейтом 4630 тонн

Наведені результати досліджень підтверджують виникнення стратифікації густини БС під час її транспортування суднами PSV. Саме виникнення стратифікації густини за глибиною вантажного танка є причиною латентного розшарування БС, зменшення її седиментаційної стійкості та утворення осаду з важких компонентів, якими вона легована.

Аналогічні результати були отримані при дослідженнях БС із густиною 1300 кг/м^3 , 1242 кг/м^3 , 1188 кг/м^3 , 1174 кг/м^3 під час їх транспортуванні на протязі 32...48 годин суднами типу PSV дедвейтом 4630 тонн та 5220 тонн [180-182].

Узагальнені експериментальні дані, виконані на суднах PSV різного дедвейту, наведено у таблиці 3.9.

Різні обсяги та геометричні розміри вантажних танків, різні характеристики БС не дозволяють скласти регресійне або апроксимаційне рівняння за результатами експерименту та використовувати його як універсальне для всіх суден. При цьому очевидна ідентичність отриманих результатів для різних умов експерименту (різних БС, різних геометричних розмірів, різного часу транспортування БС).

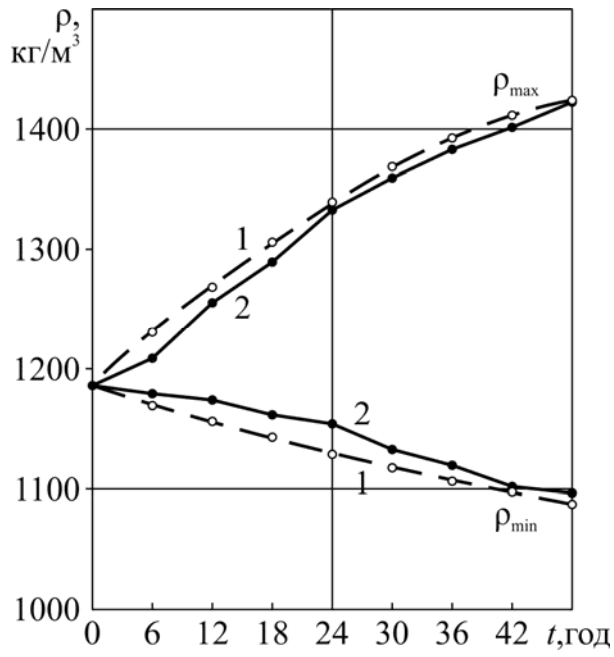
Зіставлення результатів, отриманих під час експериментальних досліджень, та аналітичних результатів, отриманих за допомогою програми ANSYS [183-185] (з урахуванням виразів, наведених у пп. 3.1-3.3), наведено на рис. 3.19.

Аналіз наданих на рис. 3.19 свідчить, що розбіжність в результатах, які отримані експериментально та аналітично, не перевищує 5...7 %, що підтверджує коректність прийнятих припущень та виконаних досліджень.

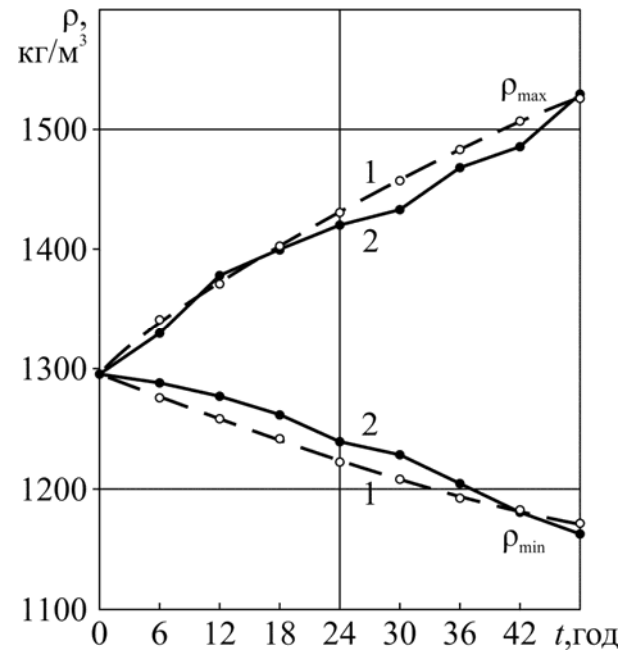
Таблиця 3.11

Узагальнені результати експериментальних досліджень

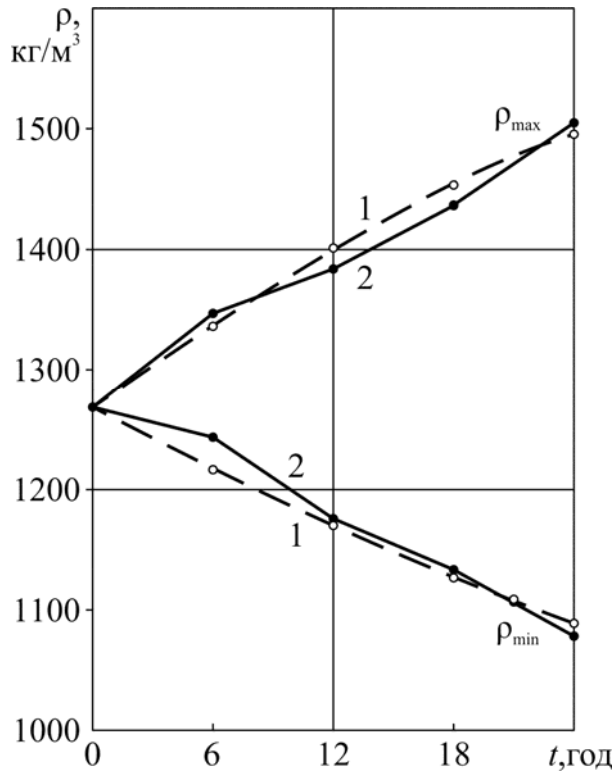
Характеристики судна PSV		Характеристики бурильної суспензії			Час транспортування, години
дедвейт, тонн	розміри вантажного танка, м	первинна густина, кг/м ³	діапазон зміни густини за глибиною танка, кг/м ³	седиментаційна стійкість, %	
5850	6,2×3,4×4,1	1185	1092...1418	0,17...29,85	0...48
5650	6,1×3,4×4,1	1295	1163...1524	0,23...31,04	0...48
4630	5,7×3,8×3,8	1240	982...1453	0,81...32,42	0...24
4630	5,7×3,8×3,8	1323	1026...1676	3,61...38,78	0...24
4630	5,7×3,8×3,8	1268	1062...1513	0,30...29,81	0...24
4410	5,8×3,6×3,7	1300	1168...1508	0,21...31,6	0...36
4410	5,8×3,6×3,7	1174	1042...1437	0,11...18,3	0...36
4410	5,8×3,6×3,7	1242	1015...1624	1,86...42,4	0...36
5220	6,0×3,3×4,2	1188	972...1318	0,22...23,27	0...48



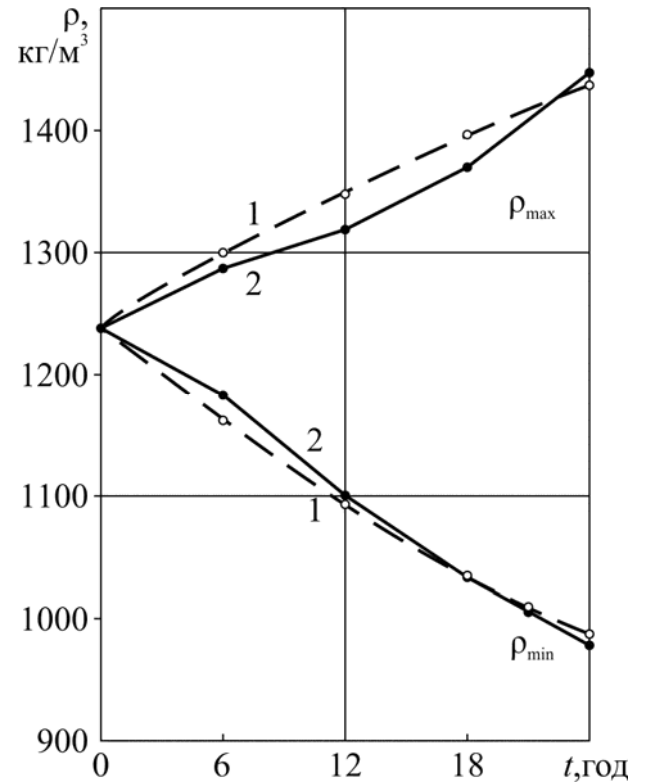
а)



б)



в)



г)

Рис. 3.19. Порівняння результатів аналітичних моделей (1) та експериментальних досліджень (2):

а – судно типа PSV дедвейтом 5850 тонн; б – 5650 тонн; в, г – 4630 тонн

3.5. Висновки за розділом 3

Як результат досліджень, виконаних в розділі 3, висвітливо наступне.

1. Коагуляція важких компонентів бурильної суспензії, що виникає через дію гравітаційних сил під час надходження бурильної суспензії у вантажних танках судна типу PSV, призводить до зменшення її стійкості. Це сприяє розшаруванню бурильної суспензії за висотою вантажного танка, у якому здійснюється її транспортування та осадження важких компонентів, яким вона легована. Управління процесом осадження можливе шляхом зміни локальних значень густини бурильної суспензії.

2. Транспортування бурильної суспензії суднами типу PSV протягом 24...36 год свідчить про зміну її реологічних характеристик, насамперед густини та седиментаційної стійкості. При цьому густина є кількісним, а седиментаційної стійкості є якісним показником зміни реологічних характеристик бурильних суспензії під час їхнього транспортування суднами типу PSV.

3. У зв'язку з неминучим розшаруванням бурильної суспензії для оцінювання її реологічних характеристик необхідно визначати максимальне та мінімальне значення густини за глибиною вантажного танку. Як мінімальне значення $\rho_{\min}$ доцільно приймати густину бурильної суспензії на поверхні (або на рівні, що відповідає 10 % загальної глибини танку), як максимальне $\rho_{\max}$ – густину у нижній частині вантажного танку (на рівні, що відповідає 90 % загальної глибини).

4. Найбільш інформативним способом оцінки зміни густини бурильної суспензії під час її транспортування є визначення площі під кривими $\rho=f(t)$, де ρ – густина, t – час транспортування. Збільшення площі під кривими $\rho_{\max}=f(t)$ відповідає збільшенню густини та утворенню осаду з важких компонентів, якими легована бурильна суспензія, в нижній частині вантажного танка. Збільшення площі під кривою $\rho_{\min}=f(t)$ відповідає

зниженню густини та утворенню рідкої фази у верхній частині та на поверхні вантажного танка.

5. Дослідженнями встановлено, що для бурильних суспензій з густиною $1174...1323 \text{ кг/м}^3$ під час їх транспортування на морських судах типу PSV дедвейтом 4410...5850 тонн протягом 24...48 годин відбувається латентна зміна їх реологічних характеристик (густина та седиментаційної стійкості).

Діапазон зміни густини бурильної суспензії за вказаними умовами транспортування складає:

- полегшування бурильної суспензії у верхній частини вантажного танку 7,85...22,45 %;
- обважнення бурильної суспензії у нижній частині вантажного танку 10,94...30,76 %;

Діапазон зміни седиментаційної стійкості бурильної суспензії за вказаними умовами транспортування складає 0,17...38,78 %.

6. Різні обсяги та геометричні розміри вантажних танків, у яких здійснювалось перевезення бурильної суспензії, різний дедвейт суден типу PSV, що забезпечували ці перевезення, різна тривалість перевезень та різні характеристики бурильних суспензій не дозволяють скласти регресійне або апроксимаційне рівняння за результатами експерименту та використовувати його як універсальне для всіх суден. При цьому для всіх експериментів доведена ідентичність отриманих результатів та збіг висновків з їх проведення.

Розділ 4. РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЇ, ЩО ЗАБЕЗПЕЧУЄ ПІДТРИМКУ РЕОЛОГІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК БУРИЛЬНИХ СУСПЕНЗІЙ ПІД ЧАС ЇХ ЗБЕРЕЖЕННЯ ТА ТРАНСПОРТУВАННЯ МОРСЬКИМИ СУДНАМИ ТИПУ PSV

Четвертий розділ дисертаційного дослідження присвячено розв'язанню 3-го та 4-го допоміжних завдань, якими є:

- визначення впливу додаткової примусової циркуляції бурильної суспензії на її реологічні характеристики;
- визначення оптимальних (з точки зору зменшення втрат потужності та скорочення часу на технологічний процес викачування бурильної суспензії з борту судна на нафтовидобувну платформу) експлуатаційних режимів роботи суднової системи збереження та транспортування бурильної суспензії.

Основні результати розділу 4 висвітлені в джерелах [2], [13], [178], [179], [182], [220], [221], [225], [227], [228].

4.1. Аналіз способів підтримання та відновлення реологічних характеристик бурильних суспензій під час їх транспортування суднами типу PSV

Інформаційний пошук, пов'язаний з визначенням зміни експлуатаційних характеристик вуглеводних рідин, що виконано в 1-му розділі, встановив, власні наукові експерименти, результати яких надано у 3-му розділі, підтвердили, що під час транспортування БС суднами типу PSV виникає їх латентне розшарування.

Для підтримки та відновлення реологічних характеристик (зокрема, в'язкості та густини) вуглеводневих рідин використовуються їх гідродинамічна, ультразвукова та хімічна обробка [186-188].

Гідродинамічний вплив на потік рідини здійснюється шляхом створення підвищеного тиску змінної або різноспрямованої амплітуди та стрибкоподібного збільшення швидкості руху рідини [189, 190]. При цьому, через роздроблення елементів дисперсної фази, збільшується їхня дисперсність і однорідність всього обсягу рідини [191, 192]. Збільшенню дисперсності також сприяє виникнення локальних кавітаційних зон, які перешкоджають коагуляції частинок дисперсної фази. При цьому зменшується рівень стратифікації густини рідини, що викликається дією гравітаційних сил.

Енергія $N_{\text{ГДК}}$, що витрачається на процес гідродинамічної кавітації, може бути оцінена за виразом

$$N_{\text{ГДК}} = K(\rho_{\text{max}} - \rho_{\text{min}})(P_{\text{ГДК}} - P_{\text{ст}})v^2,$$

де K – коефіцієнт гідродинамічної кавітації;

$\rho_{\text{max}}, \rho_{\text{min}}$ – діапазон зміни густини рідини в результаті гідродинамічної кавітації, кг/м^3 ;

$P_{\text{ГДК}}$ – тиск, що створюється в результаті гідродинамічної кавітації, кН ;

$P_{\text{ст}}$ – тиск у рідині, що у статичному стані, кН ;

v – швидкість руху рідини у процесі кавітації, м/с .

При ультразвуковій обробці у потоці рідини відбувається імпульсне підвищення та зниження тиску в локальних обсягах. Ультразвуковий вплив не тільки перешкоджає коагуляції, але й сприяє розриву міжмолекулярних зв'язків між структурними компонентами рідини (наприклад, сірководнегових C-S, натрій-хлоридних Na-Cl, кальцій-хлоридних Ca-Cl). Це, а також забезпечення турбулентного руху, призводить до підвищення

однорідності та запобігання осаду важких компонентів, що входять до складу рідини [193, 194].

Потужність ультразвукового генератора $N_{уз}$ визначається за виразом для вектора Умова-Пойтинга [195]

$$N_{уз} = \frac{1}{2} \rho \omega_{уз}^2 v a^2,$$

де ρ – густина рідини, кг/м³;

$\omega_{уз}$ – частота ультразвукового сигналу;

v – швидкість поширення ультразвукової хвилі, м/с;

a – амплітуда ультразвукової хвилі, м.

Підтримка та відновлення реологічних характеристик технічних рідин також можлива шляхом хімічної обробки. При цьому до обсягу рідини вводяться додаткові реагенти, які за рахунок міжмолекулярних взаємодій запобігають коагуляції структурних компонентів та забезпечують підтримку однорідності рідини на потрібному рівні протягом періодів зберігання і транспортування [196, 197]. До подібного ефекту також призводить використання електричних та магнітних полів [198, 199] та застосування термодинамічного впливу [201, 201]. Однак застосування їх на морському та внутрішньому водному транспорті немає широкого поширення.

Наведені способи підтримки реологічних характеристик технічних рідин застосовуються для палив та моторних мастил, що використовуються в СЕУ морського та внутрішнього водного транспорту [202, 203]. Порушення технології гідродинамічної або ультразвукової обробки технічних рідин (зокрема БС) може призвести до надмірного подрібнення дисперсної фази та подальшого зниження їх триботехнічних характеристик [13, 204]. Це згодом негативно впливатиме на процес буріння [205, 206]. Також необхідно відзначити підвищену (порівняно з паливом та моторним мастилом) питому масу БС. Максимальні значення густини важких палив знаходяться в межах

950...980 кг/м³, моторних мастил – 820...880 кг/м³, густина БС може досягати 1500 кг/м³. Це обмежує можливість гідродинамічної та ультразвукової обробки БС. У першому випадку (під час гідродинамічної обробки) суттєво підвищуються витрати енергії на забезпечення турбулентного потоку рідини, у другому (під час ультразвукової обробки) – виникає необхідність підвищення потужності генератора ультразвукових хвиль [207, 208].

Після звершення хімічної обробки у складі суспензій залишаються реагенти, які негативно впливають на металеві або синтетичні елементи системи буріння та циркуляції БС. Крім того, легкі фракції цих реагентів можуть випаровуватися з відкритої поверхні та негативно впливати на людину та навколишнє середовище [209, 210]. Важкі – підвищують рівень механічних втрат під час їх циркуляції [179, 211].

Таким чином, оптимального розв'язання важливого завдання підтримки густини та седиментаційної стійкості БС під час їх транспортування суднами типу PSV з одночасною мінімізацією енергії на забезпечення цього процесу наразі не знайдено. Як такий метод під час досліджень розглядалося забезпечення додаткової циркуляції БС між вантажними танками, у яких виконується її зберігання та транспортування.

4.2. Застосування додаткової циркуляції бурильної суспензії для підтримання її реологічних характеристик

Густина БС перевищує густину всіх інших рідин (палива, моторного мастила, прісної води), що транспортуються суднами типу PSV. Це є однією з причин симетричного розташування вантажних танків (у яких перевозиться БС) в площині судна, а також ідентичності їхніх розмірів, об'єму та маси БС, що в них знаходиться. Враховуючи підвищену питому масу БС, їх прийом на борт судна і викачування на бурову платформу виконується одночасно з

симетрично розташованих з кожного борту судна вантажних танків. Це одночасно з баластною системою підтримує стійкість судна та забезпечує безаварійне проведення робіт із постачання НВП [212, 213].

Густина БС у 1,3...1,5 рази перевищує густину нафтопродуктів (палива та мастила), що знаходяться на судні. Це (для забезпечення стійкості) змушує розташовувати вантажні танки, в яких знаходиться БС, нижче за ватерлінію. До конструктивних недоліків системи транспортування БС також належить підвищена довжина трубопроводів, що забезпечують її перекачування з борту судна океанську або морську платформу [214]. Як перше, так і друге сприяє зростанню гідродинамічних втрат, підвищує ймовірність порушення суцільності потоку під час руху суспензії за магістралями системи, а також може сприяти виникненню зривів всмоктування вантажних насосів. Розв'язання проблеми підвищення однорідності БС, що транспортується у вантажних танках спеціалізованих суден, пропонувалося різними способами, до найпоширеніших яких належить розведення / промивання суспензії морською водою, паровий обігрів магістралей, додавання спеціальних присадок [215, 216]. При цьому повинні забезпечуватись вимоги до екологічності роботи судна та СЕУ, а також до особистої безпеки суднового екіпажа [217, 218].

Одним із варіантів, що забезпечують збереження експлуатаційних властивостей БС, а також підтримку необхідного технічного та функціонального стану суднової системи зберігання та транспортування БС, є її спрощення шляхом мінімізації протяжності магістралей та трубопроводів, вибір оптимальної конструкції та режимів роботи вантажних насосів, а також безпосередній вплив на дисперсні компоненти суспензії [219, 220].

Реалізація подібної технології можлива із застосуванням додаткової системи управління, яка має забезпечувати:

- постійний моніторинг густини БС у вантажних танках та на окремих ділянках системи;
- можливість додаткової примусової циркуляції БС у вантажних танках;

- дистанційне відкриття / закриття клапанів перепуску та циркуляції;
- контроль тиску всмоктування вантажних насосів;
- контроль та сигналізацію рівня БС у вантажному танку [182].

4.2.1. Розробка технології забезпечення додаткової циркуляції бурильної суспензії під час її транспортування суднами типу PSV

Як спосіб, що забезпечує підтримку реологічних характеристик БС, (а головне – запобігає її розшаруванню і утворенню осаду з важких компонентів) можливе використання додаткової Х-подібної циркуляції суспензії між вантажними танками, що знаходяться поруч. Забезпечення цієї технології наведено на рис. 4.1. При цьому додаткові мобільні циркуляційні насоси здійснюють перекачування БС з нижньої частини одного з танків у верхню частину іншого танка поруч розташованого з ним.

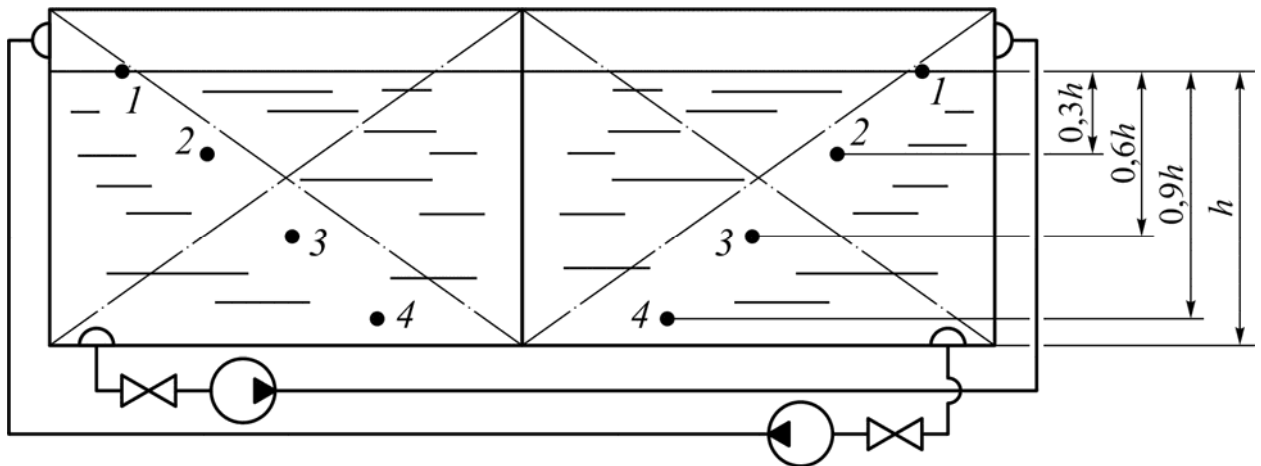


Рис. 4.1. Технологія забезпечення Х-подібної циркуляції БС у вантажних
танках судна типу PSV:

1, 6 – технологічні отвори; 2 – вантажні танки; 3, 5 – мобільні циркуляційні
насоси; 4 – гнучкі трубопроводи

Апробація цієї технології була виконана на суднах типу PSV різного дедвейту під час транспортування БС з густиною 1185...1300 кг/м³.

Для проведення досліджень та можливості зіставлення отриманих результатів звичайним способом транспортування БС, модернізація системи виконувалася тільки для однієї групи танків, розташованих з одного борту судна (п. 2 на рис. 4.1). Як насоси (п. 3, 5 на рис. 4.1) використовувалися мобільні циркуляційні насоси (тиск нагнітання 0,35...0,4 МПа, продуктивність 25 м³/год, споживана потужність 5...7 кВт). Додаткова Х-подібна циркуляція БС забезпечувалася гнучкими трубопроводами (п. 4 на рис. 4.1), які приєднувалися до технологічних отворів вантажних танків: призначених для видалення залишку – у нижній частині танка (п. 6 на рис. 4.1) та вентиляції – у верхній частині танка (п. 1 на рис. 4.1). Комплектація системи іншої групи танків не змінювалася. Технологія робіт із переобладнання системи та контроль їх виконання були узгоджені з технічним департаментом компанії, яка забезпечувала менеджмент судна. Роботи з модернізації системи транспортування бурильної суспензії виконували судовим екіпажем під час стоянки судна. Тривалість виконання робіт становила 30 годин [221].

4.2.2. Результати досліджень, виконаних під час перевезення бурильної суспензії на суднах типу PSV

Експериментальні дослідження щодо визначення впливу додаткової примусової Х-подібної циркуляції БС на її реологічні характеристики виконувались відповідно до технології, наведеної в п. 3.4. Додатково до цього контролювався технічний стан системи збереження та циркуляції БС, тиск та споживана потужність мобільних циркуляційних насосів. Це

забезпечувало суцільність потоку БС у гнучких трубопроводах та відсутність протікання БС у з'єднаннях.

Відповідно до схеми, наведеної на рис. 4.1 додаткова Х-подібна циркуляція БС у вантажних танках забезпечувалася двома насосами, за допомогою яких підтримувалося рух БС з нижньої частини одного танка у верхню частину іншого. Це запобігало латентному розшаруванню БС у танку та підтримувало однорідний стан БС, що згодом передається на бурову платформу. Контроль реологічних характеристик БС здійснювався шляхом вимірювання густини в різних точках вантажного танка (точки 1, 2, 3, 4 на рис. 4.1). При цьому густина рідини в точці 1 відповідала густині на поверхні, у точці 2 – на рівні 30 % від загальної висоти вантажного танка – $0,3h$, в точці 3 – на рівні – $0,6h$, у точці 4 – на рівні – $0,9h$ [2, 220].

Конструкція спеціалізованого судна PSV та технологія транспортування БС передбачала її перевезення у чотирьох рівнорозмірних вантажних танках. У двох із них виконувалася модернізація (встановлювалася система додаткової Х-подібної циркуляції відповідно до рис. 4.1). Перевезення БС у двох інших танках проводилося у звичайних умовах, без їх модернізації.

Під час транспортування кількість БС у вантажних танках не змінювалось. Зовнішні збурення (вітер та хитами моря) не здійснювали суттєвого впливу на крен та диферент судна, тому рівень БС у вантажних танках залишався постійним.

В обох парах вантажних танків виконувався контроль густини БС на різних висоті (у точках 1, 2, 3, 4 – рис. 4.1) у наступному інтервалі часу: 6, 12, 18, 24 годин. Усереднені результати вимірювання в однакових точках однотипних танків (двох без модернізації та двох з додатковою Х-подібною циркуляцією) наведено у таблиці 4.1 [220].

За результатами, наведеними в таблиці 4.1, побудовані номограми, що відображають зміну густини БС за часом в різних за висотою вимірювання точках вантажних танків (рис. 4.2).

Таблиця 4.1

Густина бурильної суспензії, ρ , кг/м³, за різних умов її транспортування на судні типу PSV дедвейтом 4630 тонн

Час, години	Спосіб транспортування							
	<i>a</i>				<i>б</i>			
	на поверхні	0,3 <i>h</i>	0,6 <i>h</i>	0,9 <i>h</i>	на поверхні	0,3 <i>h</i>	0,6 <i>h</i>	0,9 <i>h</i>
0	1240	1240	1246	1250	1240	1248	1242	1238
6	1185	1252	1265	1294	1238	1242	1240	1243
12	1108	1235	1282	1324	1232	1245	1244	1246
18	1043	1173	1312	1386	1234	1237	1243	1248
24	982	1065	1376	1453	1235	1243	1247	1253

Примітка: *a* – транспортування без зміни конструкції;

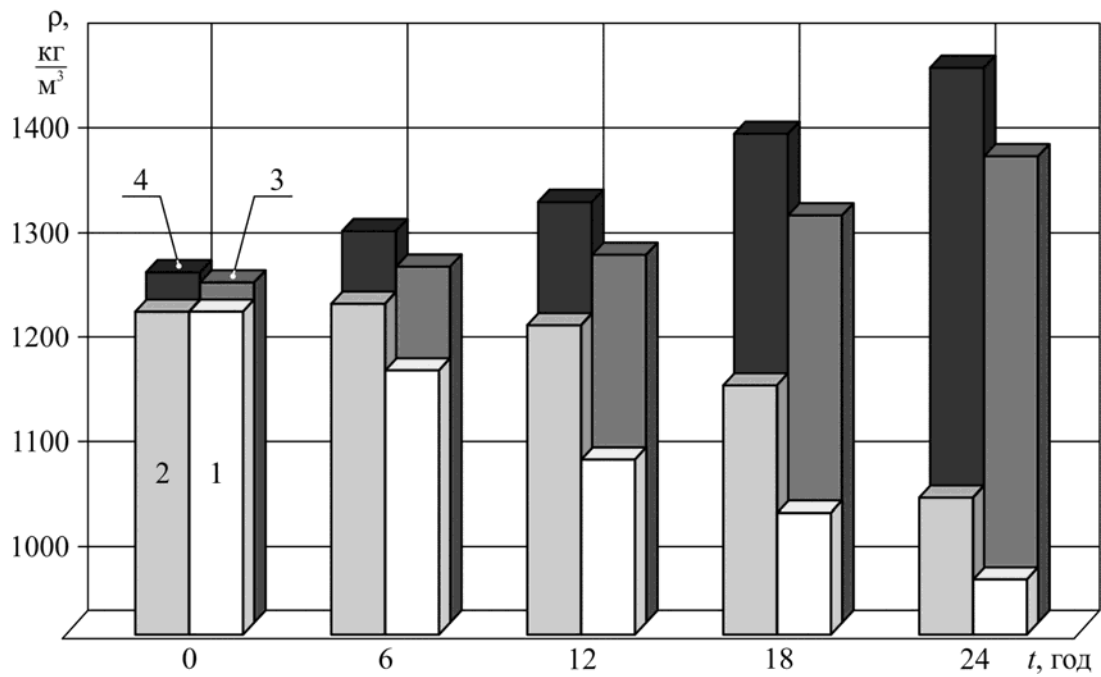
б – транспортування з додатковою Х-подібною циркуляцією

Аналогічно дослідженням, технологія та результати яких наведені в п. 3.4, як критерій ефективності додаткової Х-подібної циркуляції приймалася седиментаційна стійкість БС. Для значень густини БС, наведених у таблиці 4.1, величина седиментаційної стійкості може бути розрахована за виразом

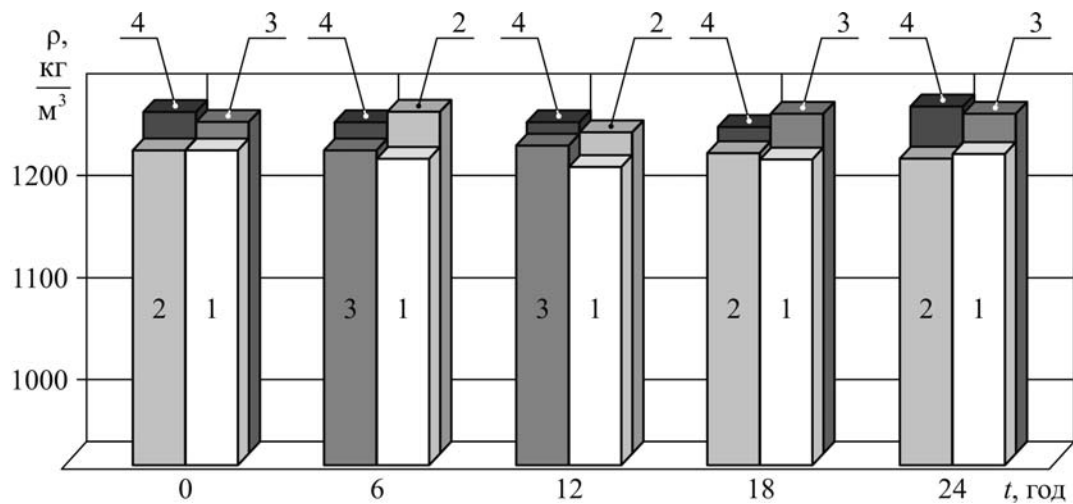
$$\Delta\rho = \frac{\rho_{90} - \rho_0}{\rho_{90}} \cdot 100\%,$$

де ρ_{90} , ρ_0 – густина БС на рівнях 0,9*h* та на поверхні вантажного танка відповідно (рис. 4.1).

У такому разі отримаємо значення, що наведені в таблиці 4.2 і показані на номограмі рис. 4.3.



а)



б)

Рис. 4.2. Зміна густини бурильної суспензії за різних умов її транспортування на судні типу PSV дедвейтом 4630 тонн:

а) без циркуляції; б) із додатковою Х-подібною циркуляцією;

1 – на поверхні танка; 2 – на глибині 30 % загального обсягу;

3 – на глибині 60 %; 4 – на глибині 90 %

Таблиця 4.2

Седиментаційна стійкість бурильної суспензії, $\Delta\rho$, % за різних умов її транспортування на судні типу PSV дедвейтом 4630 тонн

Час, години	Спосіб транспортування	
	<i>a</i>	<i>б</i>
0	0,8	0,2
6	8,42	0,4
12	16,31	1,12
18	24,75	1,12
24	32,42	1,44

Примітка: *a* – транспортування без зміни конструкції;

б – транспортування з додатковою Х-подібною циркуляцією

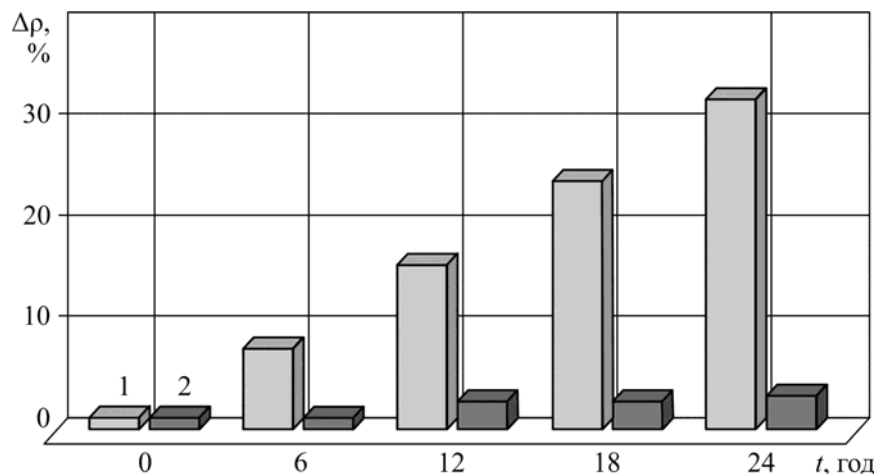


Рис. 4.3. Седиментаційна стійкість БС, $\Delta\rho$, % за різних умов її транспортування на судні типу PSV дедвейтом 4630 тонн:

1 – транспортування без зміни конструкції системи;

2 – транспортування з додатковою Х-подібною циркуляцією

Аналогічні дослідження виконувались на тому ж судні під час транспортування БС з іншими характеристиками [178].

Результати досліджень наведено у таблицях 4.3, 4.4, а також на номограмах рис. 4.4, 4.5.

Таблиця 4.3

Густина бурильної суспензії, ρ , кг/м³ за різних умов її транспортування на судні типу PSV дедвейтом 4630 тонн

Час, години	Спосіб транспортування							
	<i>a</i>				<i>б</i>			
	на поверхні	0,3h	0,6h	0,9h	на поверхні	0,3h	0,6h	0,9h
0	1323	1330	1355	1373	1323	1330	1355	1373
6	1234	1280	1386	1417	1288	1325	1351	1362
12	1127	1187	1476	1520	1313	1360	1341	1336
18	1087	1123	1506	1561	1328	1363	1352	1318
24	1026	1043	1602	1676	1305	1381	1335	1352

Примітка: *a* – транспортування без зміни конструкції;

б – транспортування з додатковою Х-подібною циркуляцією

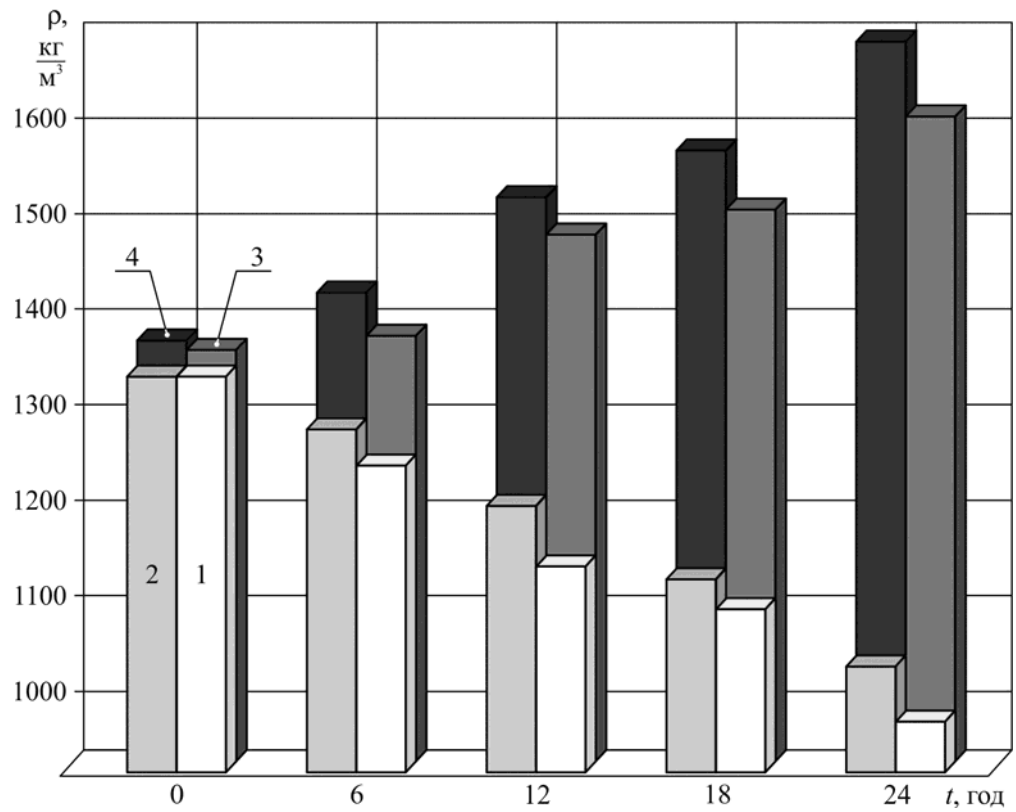
Таблиця 4.4

Седиментаційна стійкість бурильної суспензії, $\Delta\rho$, % за різних умов її транспортування на судні типу PSV дедвейтом 4630 тонн

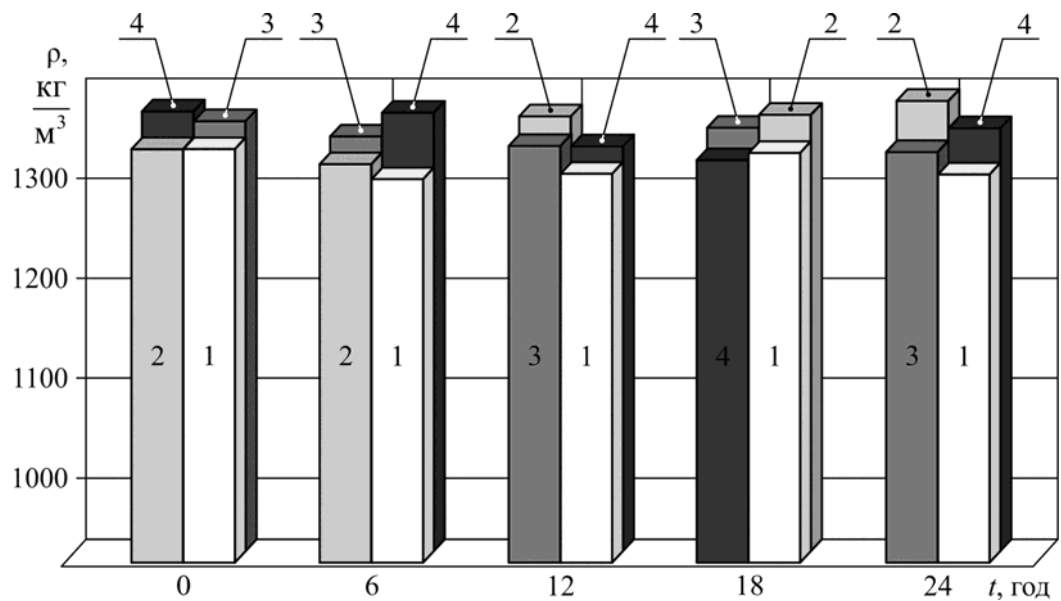
Час, години	Спосіб транспортування	
	<i>a</i>	<i>б</i>
0	3,64	3,64
6	12,92	5,43
12	25,86	3,45
18	30,37	2,57
24	38,78	5,52

Примітка: *a* – транспортування без зміни конструкції;

б – транспортування з додатковою Х-подібною циркуляцією



а)



б)

Рис. 4.4. Зміна густини бурильної суспензії за різних умов її транспортування на судні типу PSV дедвейтом 4630 тонн:

а) без циркуляції; б) із додатковою Х-подібною циркуляцією;

1 – на поверхні танка; 2 – на глибині 30 % загального обсягу;

3 – на глибині 60 %; 4 – на глибині 90 %

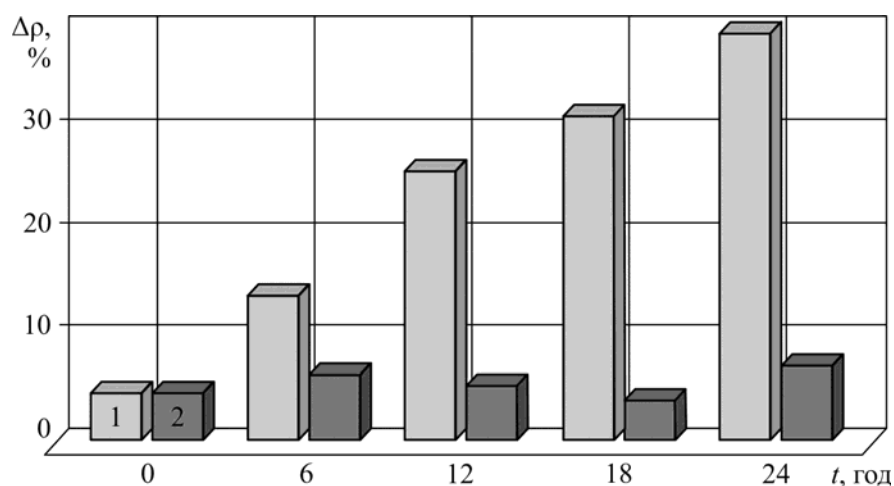


Рис. 4.5. Седиментаційна стійкість БС, $\Delta\rho$, % за різних умов її транспортування на судні типу PSV дедвейтом 4630 тонн:

1 – транспортування без зміни конструкції системи;

2 – транспортування з додатковою Х-подібною циркуляцією

За аналогічною послідовністю виконувались дослідження на судах типу PSV з дедвейтом 4410 та 5650 тонн під час перевезення БС з густиною 1174 та 1295 кг/м³.

Отримані під час досліджень на судах PSV різного дедвейту результати характеризуються між собою односпрямованістю та збігом висновків. Для всіх випадків забезпечення додаткової Х-подібної циркуляції БС між вантажними танками, що знаходяться поруч, сприяє зменшенню коагуляції важких компонентів, якими легована БС, знижує розшарування БС за глибиною вантажного танка, призводить до 7,5...22,5 кратного (залежно від характеристик БС та тривалості її транспортування) підвищення її седиментаційної стійкості.

Наведені результати підтверджують доцільність використання додаткової Х-подібної циркуляції для підтримки реологічних характеристик БС під час її транспортування на судах PSV. Тому додаткова Х-подібна циркуляція БС між танками, що розташовані поруч один до одного рекомендована як спосіб модернізації системи зберігання та транспортування БС на судах типу PSV.

4.3. Підтримання реологічних характеристик бурильної суспензії шляхом комплексного впливу на її структурні компоненти

4.3.1. Технологія і послідовність виконання експериментів

Дослідження, результати яких наведені у п. 4.2, підтвердили ефективність модернізації системи зберігання та циркуляції БС на судах типу PSV шляхом забезпечення додаткової примусової циркуляції БС між вантажними танками, що знаходяться поруч один до одного.

Наступним кроком дослідження було пошук додаткового способу підтримання реологічних характеристик БС під час їх транспортування та запобігання утворення осаду з важких компонентів, якими вона легована. Деякими дослідженнями, що виконувались в Національному університеті «Одеська морська академія», було визначено позитивний вплив повітря, що подається під час ультразвукової обробки палива, на інтенсивність ультразвукового опромінювання та подальший стан та функціональні властивості судового важкого палива [52, 187, 207].

З метою підтримки реологічних характеристик БС, запобігання її розшарування та утворення осаду з важких компонентів було розроблено комплексний метод. При цьому судову систему збереження та циркуляції БС модернізували за рахунок:

- встановлення додаткових трубопроводів та мобільних циркуляційних насосів, що забезпечувало Х-подібну циркуляцію суспензії у танках;
- встановлення в нижню частину вантажного танка аеродинамічних вставок, якими подавалося повітря.

Експериментальні дослідження з модернізованою таким чином системою зберігання та транспортування БС виконували на судні типу PSV дедвейтом 5650 тонн [221]. Зміни, внесені до системи, наведені на рис. 4.6.

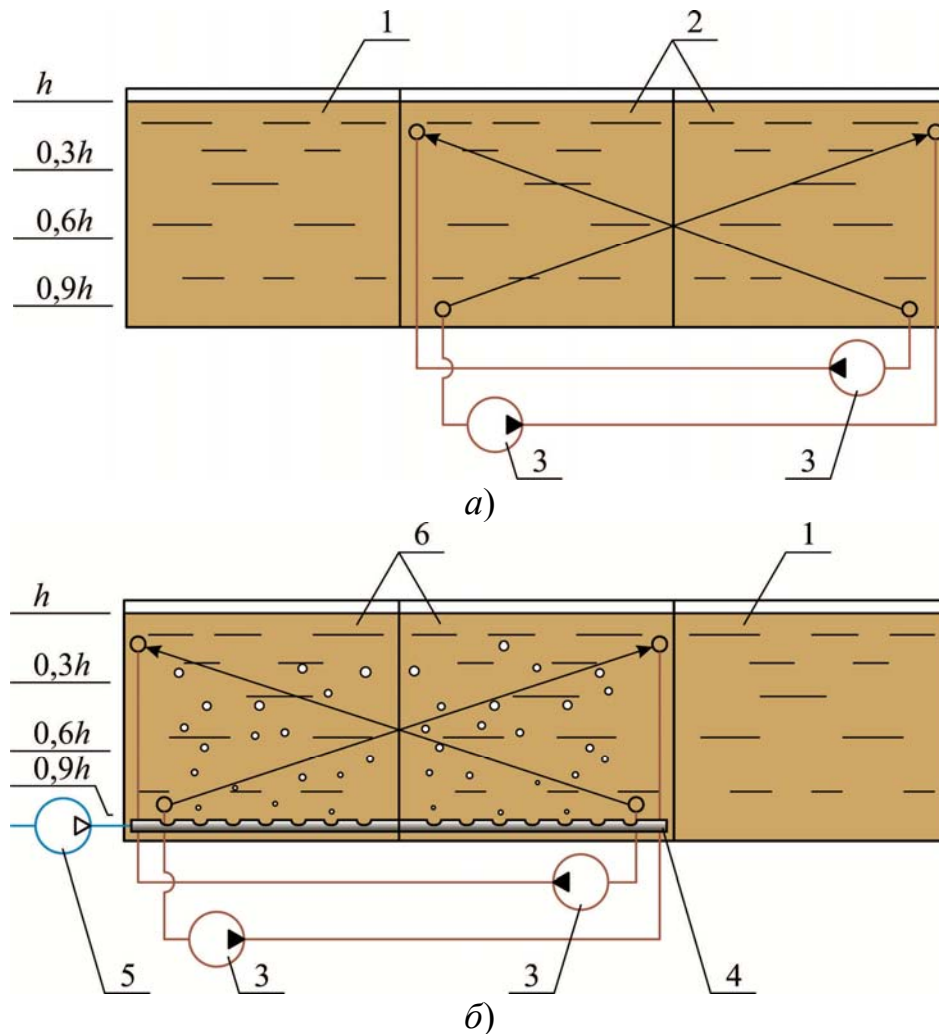


Рис. 4.6. Принципова схема включення додаткових блоків до суднової системи транспортування БС:

а – забезпечення Х-подібної циркуляції БС у вантажних танках;

б – забезпечення Х-подібної циркуляції БС у вантажних танках з одночасною подачею повітря в їх нижню частину:

1 – вантажні танки без зміни способу транспортування БС; 2 – вантажні танки з додатковою Х-подібною циркуляцією БС; 3 – мобільні циркуляційні насоси; 4 – аеродинамічні вставки; 5 – повітряний компресор; 6 – вантажні танки з додатковою Х-подібною циркуляцією БС та подачею повітря в нижню частину

Вантажні танки, що наведені на рис. 4.6 *а, б* розташовувалися по лівому та правому борту судна типу PSV. У двох вантажних танках (позиція 2 на рис. 4.6, *а*), розташованих з одного борту судна, за допомоги мобільних

циркуляційних насосів 3 забезпечувалася додаткова Х-подібна циркуляція БС. У двох вантажних танках (позиція 6 на рис. 4.6, б), розташованих з іншого борту судна, за допомогою мобільних циркуляційних насосів 3 забезпечувалася додаткова Х-подібна циркуляція БС, а за допомогою повітряного компресора 5 через аеродинамічні вставки 4 подавалося повітря в нижню частину танка. У вантажних танках 1, розташованих з кожного борту судна, спосіб транспортування БС не змінювався і жодних змін не виконувалося.

Зміни, що внесені до системи, виконувались судновим екіпажем та були узгоджені з технічним департаментом судноплавної компанії. Трудомісткість виконаних робіт не перевищувала 40 годин. Роботи виконувались під час стоянки судна з суворим дотриманням міжнародних норм щодо захисту довкілля від забруднень та забезпеченням вимог пожежної та особистої безпеки.

Аналогічно попереднім дослідженням, як контрольний параметр, за яким оцінювалося дисперсний стан БС, приймалася густина [222, 223]. Її визначення виконувалось електронним ареометром dm-230.1a фірми Vorr&Reuther Messtechnik (Німеччина), що відповідає нормам європейського стандарту ASTM D7777 та американського стандарту IP559, а також внесений до реєстру України з метеорологічної атестації. Ареометр дозволяє виконувати вимірювання густини в діапазоні $750 \dots 1850 \text{ кг/м}^3$ в ємностях глибиною до 6 м.

Визначення густини БС виконувалось у різних точках вантажного танка, відповідних 30-ти, 60-ти і 90 % його глибини. Для проведення експерименту перевезення БС здійснювалося за таких умов:

- 1) два танки без зміни конструкції системи;
- 2) два танки, у яких додатково забезпечувалася Х-подібна циркуляція БС – рис. 4.6, а;
- 3) два танки, у яких додатково забезпечувалася Х-подібна циркуляція БС та примусова подача повітря в нижню частину вантажного танка – рис. 4.6, б.

4.3.2. Результати досліджень

Час переходу судна PSV від порту до бурової платформи становив 44 години, що давало можливість здійснювати відбір проб БС для всіх умов експерименту протягом 36 годин з проміжком між вимірюваннями густини 6 годин. Результати досліджень наведено у таблиці 4.5.

Таблиця 4.5

Зміна густини бурильної суспензії (ρ , кг/м³) за глибиною вантажного танка залежно від часу та способу її транспортування

Рівень, на якому виконувались вимірювання	Час транспортування, години						
	0	6	12	18	24	30	36
Транспортування без зміни конструкції системи							
на поверхні	1232	1218	1205	1188	1173	1135	1105
0,3h	1232	1230	1222	1205	1189	1178	1152
0,6h	1233	1248	1265	1285	1301	1345	1406
0,9h	1235	1255	1282	1312	1342	1385	1463
Транспортування з додатковою Х-подібною циркуляцією							
на поверхні	1232	1220	1215	1202	1182	1179	1176
0,3h	1233	1226	1222	1208	1196	1194	1185
0,6h	1233	1242	1246	1246	1249	1258	1262
0,9h	1236	1248	1259	1262	1268	1272	1282
Транспортування з додатковою Х-подібною циркуляцією та подачею повітря в нижню частину вантажного танка							
на поверхні	1233	1232	1231	1228	1227	1226	1226
0,3h	1233	1232	1232	1232	1231	1231	1230
0,6h	1235	1236	1242	1245	1248	1251	1253
0,9h	1236	1241	1248	1251	1258	1262	1263

Графічні залежності, що показують зміну густини БС у часі різних умов її транспортування, показані на рис. 4.7.

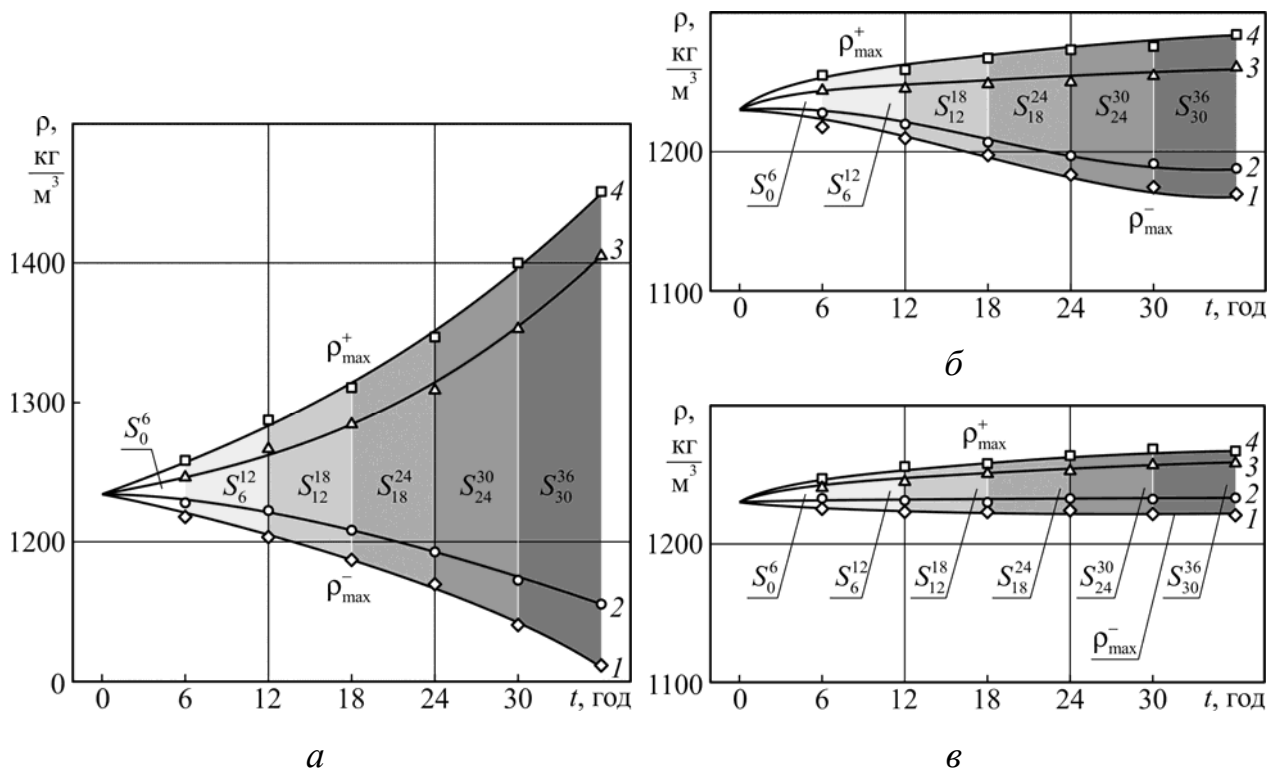


Рис. 4.7. Зміна густини БС за різних умов її транспортування:

a – транспортування без зміни конструкції системи; *б* – з додатковою Х-подібною циркуляцією; *в* – з додатковою Х-подібною циркуляцією та одночасною подачею повітря;
1 – густина БС на поверхні танка; 2, 3, 4 – на рівні, що відповідає 30 %, 60 %, 90 % глибини танка

Результати, які наведені у таблиці 4.5 та на рис. 4.7 свідчать, що зменшення / збільшення густини БС під час її транспортування суднами типу PSV відбувається за експонентним законом. Максимальне збільшення густини $\rho_{\max}^+$ (і відповідне тяжіння БС) відповідає нижній частині вантажного танка (глибині 90%). Максимальне зниження густини $\rho_{\max}^-$ відповідає шару БС, що знаходиться на поверхні вантажного танка.

Найбільші значення $\rho_{\max}^+$ та $\rho_{\max}^-$ відповідають транспортуванню БС без зміни конструкції системи. У цьому випадку седиментаційна стійкість БС за глибиною вантажного танка також має найбільше значення. Її значення визначається за виразом

$$\Delta\rho = \frac{\rho_{\max}^+ - \rho_{\max}^-}{\rho_{\max}^+} 100\%,$$

та для часу транспортування 6...36 год становить $\Delta\rho=2,94\ldots24,47\%$).

У випадку модернізації системи стратифікація густини становить:

- за додаткової Х-подібної циркуляції $\Delta\rho=2,24\ldots8,27\%$;
- за додаткової Х-подібної циркуляції та одночасною подачею повітря в нижню частину вантажного танка – $\Delta\rho=0,73\ldots2,93\%$ [221].

Ефективність запропонованих способів модернізації системи зберігання та циркуляції БС на суднах типу PSV можна оцінити за рис. 4.8 як площа, що обмежена експонентами максимального збільшення $\rho_{\max}^+$ та максимального зниження $\rho_{\max}^-$ густини БС за вибраний проміжок часу.

Дані площі (S_0^6 , S_6^{12} , S_{12}^{18} , S_{18}^{24} , S_{24}^{30} , S_{30}^{36}) можуть бути розраховані як площі відповідних трапецій [224]. При цьому оцінка може бути виконана для будь-якого часового проміжку та будь-якої загальної тривалості експерименту.

Значення площ трапецій (які характеризують стратифікацію густини БС за глибиною вантажного танка та є критерієм оцінки стратифікації густини) наведено у таблиці 4.6. Площа даних трапецій має розмірність (кг·год/м³), проте далі (у тексті та таблиці 4.6) вказуються лише чисельні значення. Збільшення площі відповідає підвищенню стратифікації густини по глибині вантажного танка та утворенню осаду важких компонентів БС.

Таблиця 4.6

Критерій оцінки седиментаційної стійкості бурильної суспензії за глибиною вантажного танка залежно від часу та способу її транспортування

Спосіб транспортування	Час транспортування, години					
	6	12	18	24	30	36
1	120	342	603	879	1257	1824
2	96	216	312	438	537	597
3	36	78	120	162	201	219

Примітка: 1 – без зміни конструкції системи; 2 – транспортування з додатковою Х-подібною циркуляцією; 3 – транспортування з додатковою Х-подібною циркуляцією та подачею повітря в нижню частину вантажного танка

Результати таблиці 4.6 узагальнені як номограма, що показана на рис. 4.8.

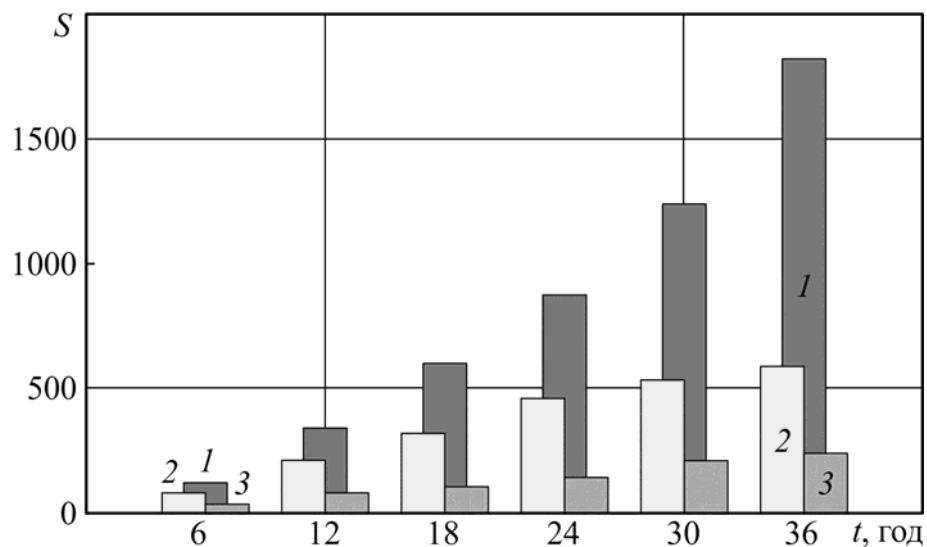


Рис. 4.8. Критерій оцінки стратифікації густини БС залежно від часу для різних умов транспортування:

- 1 – без зміни конструкції системи; 2 – додаткова Х-подібна циркуляція;
3 – додаткова Х-подібна циркуляція та примусова подача повітря в нижню частину вантажного танка

Номограми, що наведені на рис. 4.8, підтверджують ефективність запропонованих способів підтримки густини БС. Повністю запобігти процесу осадження важких компонентів, що входять до складу БС, неможливо жодним варіантом. У цьому їх використання сприяє 3,6...10,9 кратному збільшенню седиментаційної стійкості БС.

З метою поширення масиву експериментальних даних та розповсюдження пропанової технології та зроблених висновків, випробування були продовжені на іншому морському судні PSV дедвейтом 5850 тонн під час транспортування БС з густиною 1162 кг/м³.

Технологія модернізації суднової системи зберігання та циркуляції БС при цьому збігалася з викладеною в п. 4.3.1, їх тривалість складала 40 годин, їх виконання забезпечувалось судновим екіпажем, контролювалось представниками технічного департаменту, що відповідають за менеджмент судна та СЕУ, та було здійснено під час виведення судна з експлуатації (що не впливало на його ходовий час роботи та не знижувало його економічні показники).

Час переходу судна PSV від порту до моменту видачі БС на бурову платформу складав 56 годин, що давало можливість здійснювати відбір проб БС для всіх умов експерименту протягом 48 годин з проміжком між вимірами густини 6 годин. Під час морського переходу судно не піддавалось підвищеним зовнішнім навантаженням, крен та диферент судна залишались постійними, тому як постійний приймався рівень БС у вантажних танках протягом всього експерименту. Також з постійною продуктивністю та навантаженням експлуатувались додаткові мобільні циркуляційні насоси та повітряний компресор (п. 3 та 5 на рис. 4.6).

Результати цих досліджень наведені у таблиці 4.7 [225].

Результати досліджень також відображені на рис. 4.8, 4.9 (на яких показані зміни густини та седиментаційної стійкості БС залежно від часу та умов транспортування).

Таблиця 4.7

Густина (ρ , кг/м³) та седиментаційна стійкість ($\Delta\rho$, %) БС за глибиною вантажного танка залежно від часу та способу її транспортування

	Час транспортування, години								
	0	6	12	18	24	30	36	42	48
	Транспортування без зміни конструкції системи								
ρ , кг/м ³ , на поверхні	1162	1135	1128	1117	1085	1052	1008	962	922
на глибині: 0,3h	1162	1142	1139	1128	1102	1088	1028	1011	978
0,6h	1163	1165	1188	1209	1218	1225	1231	1239	1252
0,9h	1164	1178	1208	1234	1243	1258	1283	1302	1322
$\Delta\rho$, %, за глибиною танку	0,17	3,79	7,09	10,47	14,56	19,58	27,28	35,34	43,38
Транспортування з додатковою Х-подібною циркуляцією									
ρ , кг/м ³ , на поверхні	1162	1148	1135	1128	1122	1118	1111	1110	1108
на глибині: 0,3h	1163	1160	1157	1152	1148	1143	1140	1137	1136
0,6h	1163	1166	1172	1176	1180	1182	1188	1208	1225
0,9h	1164	1168	1174	1179	1185	1193	1202	1228	1255
$\Delta\rho$, %, за глибиною танку	0,17	1,74	3,44	4,52	5,61	6,71	8,19	9,61	11,71
Транспортування з додатковою Х-подібною циркуляцією та подачею повітря									
ρ , кг/м ³ , на поверхні	1163	1160	1157	1156	1155	1154	1153	1153	1152
на глибині: 0,3h	1163	1164	1165	1167	1169	1172	1175	1178	1181
0,6h	1165	1166	1168	1172	1176	1178	1183	1187	1191
0,9h	1165	1168	1172	1176	1180	1183	1187	1191	1202
$\Delta\rho$, %, за глибиною танку	0,17	0,68	1,28	1,70	2,12	2,45	2,86	3,19	4,16

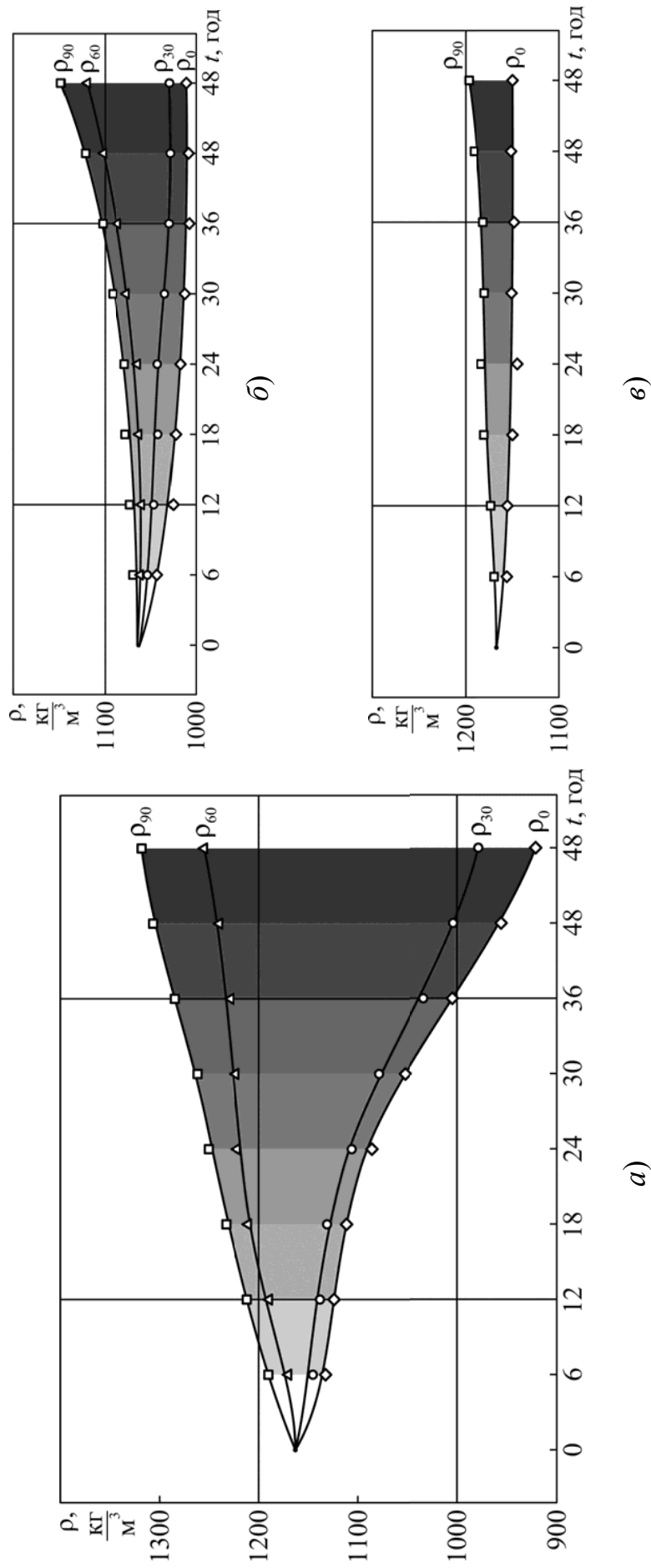


Рис. 4.8. Зміна густини БС від часу для різних умов її транспортування суднами типу PSV:

$\rho_0, \rho_{30}, \rho_{60}, \rho_{90}$ – густина на поверхні, на глибині 30, 60, 90 % загальної глибини вантажного танка;

а – транспортування без зміни конструкції системи; б – транспортування з додатковою Х-подібною циркуляцією;

в – транспортування з додатковою Х-подібною циркуляцією та подачею повітря

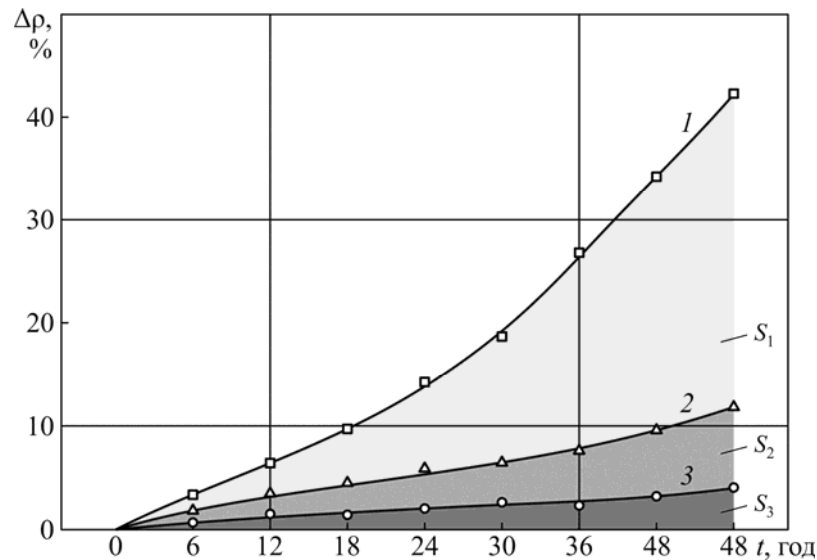


Рис. 4.9. Зміна седиментаційної стійкості БС залежно від часу для різних умов її транспортування суднами типу PSV:

1 – транспортування без зміни конструкції системи; 2 – транспортування з додатковою Х-подібною циркуляцією; 3 – транспортування з додатковою Х- подібною циркуляцією і подачею повітря

Ефективність системи збереження і циркуляції БС може бути оцінена як інтеграл залежності $\Delta\rho=f(t)$ [221]. Для залежностей, поданих на рис. 4.9, це значення може бути визначено як площа під кривими 1, 2, 3. Значення площі доцільно представити як суму трапецій, обмежених значеннями часу (0-6-...-42-48) та седиментаційної стійкості

$$\int_0^{48} \Delta\rho(t) dt \approx \frac{h}{2} [\Delta\rho_0^6 + 2\Delta\rho_6^{12} + \dots + 2\Delta\rho_{36}^{42} + \Delta\rho_{42}^{48}] \quad (4.1)$$

де h – крок інтегрування (для розглянутого випадку $h=6$);

$\Delta\rho_0^6, \Delta\rho_6^{12} \dots \Delta\rho_{36}^{42}, \Delta\rho_{42}^{48}$ – величина седиментаційної стійкості на відповідних часових інтервалах.

Що більше значення площі, то вище рівень седиментаційної стійкості БС під час її транспортування. Зменшення площі свідчить про підвищення ефективності обраного способу вдосконалення системи збереження і

циркуляції бурильної суспензії [2, 220]. Значення площі має розмірність [%·час], однак для зручності сприйняття будемо враховувати тільки чисельні значення. Для залежностей, поданих на рис. 4.9, відповідно до (4.1) отримаємо: $S_1=224,3$; $S_2=58,2$; $S_3=19,5$.

Порівняльну оцінку способів транспортування БС здійснимо як відношення площ

$$\frac{S_1}{S_2} = 3,85; \quad \frac{S_1}{S_3} = 11,5.$$

Наведені результати підтверджують ефективність використання додаткової Х-подібної циркуляції та подачі повітря в нижню частину вантажного танка під час транспортуванні БС [54, 225, 226].

Цикл експериментальних досліджень був продовжений для БС із густиною 1172 кг/м³. Час переходу судна PSV від порту до бурової платформи становило 52 години, що давало можливість здійснювати відбір проб БС всіх умов експерименту протягом 48 годин з проміжком між вимірюваннями густини 6 годин [13, 227].

Вимірювання з діапазоном 6 годин можливо виконувати посередині чотиригодинної суднової вахти, під час її несення вахтовим механіком в машинному відділенні та центральному посту керування СЕУ. Як правило в цей проміжок часу вахтовий механік вже встигає виконати всі обов'язки, що пов'язані з спостереженням та обслуговуванням машин та механізмів, тому може переспрямувати свою увагу на виконання дослідницьких робіт та подальшу обробку отриманих результатів.

Результати досліджень наведено у таблиці 4.8 та рис. 4.10

Таблиця 4.8

Зміна густини бурильної суспензії (ρ , кг/м³) за глибиною вантажного танка залежно від часу та способу її транспортування

Рівень, на якому виконувались вимірювання	Час транспортування, години								
	0	6	12	18	24	30	36	42	48
Транспортування без зміни конструкції системи									
на поверхні	1172	1138	1063	992	978	967	948	928	912
0,3h	1172	1144	1110	1072	1062	1043	1040	1033	1030
0,6h	1175	1178	1182	1185	1188	1192	1199	1202	1207
0,9h	1176	1191	1226	1238	1239	1245	1250	1258	1278
Транспортування з додатковою Х-подібною циркуляцією									
на поверхні	1174	1136	1128	1108	1095	1091	1085	1084	1084
0,3h	1175	1148	1145	1142	1140	1131	1118	1118	1110
0,6h	1177	1177	1178	1179	1178	1180	1180	1182	1183
0,9h	1177	1177	1178	1179	1180	1182	1182	1185	1185
Транспортування з додатковою Х-подібною циркуляцією та подачею повітря в нижню частину вантажного танка									
на поверхні	1173	1170	1163	1163	1160	1159	1157	1157	1156
0,3h	1175	1171	1166	1165	1164	1162	1162	1161	1161
0,6h	1175	1175	1176	1177	1178	1178	1178	1180	1180
0,9h	1177	1177	1178	1178	1178	1177	1179	1180	1181

Графічні залежності, що відображають зміну густини БС у часі за різних умов її транспортування, показані на рис. 4.10.

Аналогічно попереднім дослідженням результати, які наведені в таблиці 4.8 та на рис. 4.10 свідчать, що зменшення / збільшення густини БС відбувається за експонентним законом.

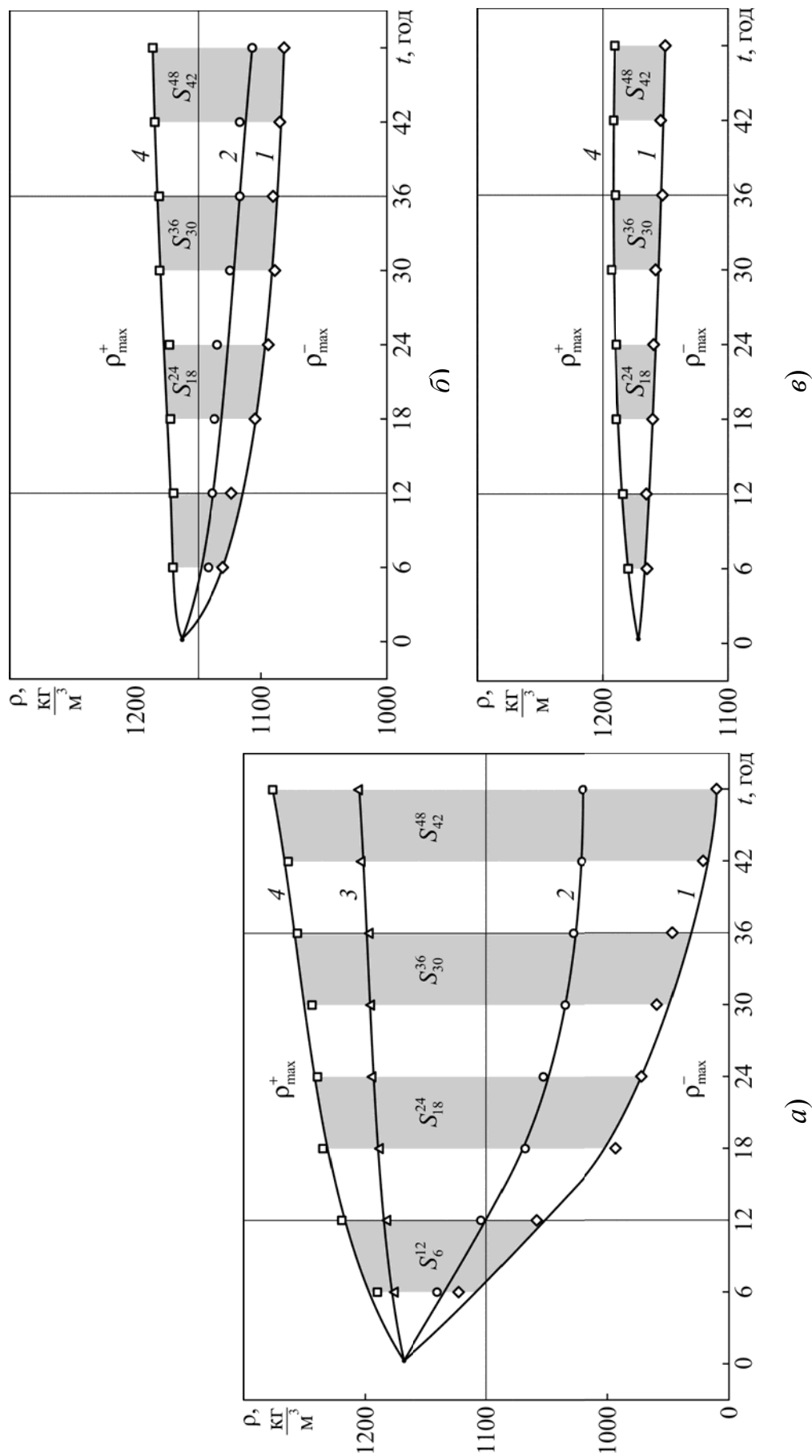


Рис. 4.10. Зміна густини БС від часу для різних умов її транспортування суднами типу PSV:

а – Транспортування без зміни конструкції системи; б – с додатковою Х-подібною циркуляцією;

в – с додатковою Х-подібною циркуляцією та подачею повітря в нижню частину вантажного танка;

1 – густина на поверхності танка; 2, 3, 4 – на рівне, що відповідає 30 %, 60 %, 90 % глибини вантажного танка

Максимальне збільшення густини $\rho_{\max}^+$ (і відповідне обважування БС) відповідає нижній частині вантажного танка (глибині 90 %). Максимальне зниження густини $\rho_{\max}^-$ відповідає шару БС, що знаходиться на поверхні вантажного танка. Найбільші значення $\rho_{\max}^+$ та $\rho_{\max}^-$ відповідають транспортуванню БС без зміни конструкції системи.

Седиментаційна стійкість БС при такому варіанті її транспортування в діапазоні часу 6...48 год змінюється в діапазоні $\Delta\rho=4,45\ldots28,64\%$.

У разі додаткової Х-подібної циркуляції седиментаційна стійкість БС по глибині вантажного танка для того ж проміжку часу становить $\Delta\rho=3,48\ldots8,52\%$.

Під час транспортування БС з додатковою Х-подібною циркуляцією та одночасною подачею повітря в нижню частину вантажного танку значення седиментаційної становить $\Delta\rho=0,59\ldots2,12\%$.

Визначимо за рис. 4.10 площі, що обмежені експонентами максимального збільшення $\rho_{\max}^+$ та максимального зниження $\rho_{\max}^-$ густини, а також проміжком часу транспортування (6...12...18...24...30...36...42...48 годин). Дані площі (S_0^6 , S_6^{12} , S_{12}^{18} , S_{18}^{24} , S_{24}^{30} , S_{30}^{36} , S_{36}^{42} , S_{42}^{48}) можуть бути розраховані як площі відповідних трапецій (на рис. 4.10 площі S_0^6 , S_{12}^{18} , S_{24}^{30} , S_{36}^{42} , а також експоненти густини 3 на рис. 4.10, а та 2, 3 на рис. 4.10, б не вказані для кращої візуалізації). Значення площ трапецій (які характеризують седиментаційну стійкість БС по глибині вантажного танка та є критерієм оцінки стратифікації густини) наведено у таблиці 4.9.

Площа даних трапецій має розмірність (кг·год/м³), проте далі (у тексті та таблиці 4.9) вказуються лише чисельні значення. Збільшення площі відповідає зниженню седиментаційної стійкості за глибиною вантажного танка та утворення осаду важких компонентів БС.

Таблиця 4.9

Критерій оцінки стратифікації густини бурильної суспензії за глибиною вантажного танка залежно від часу та способу її транспортування

Спосіб транспортування	Час транспортування, години							
	6	12	18	24	30	36	42	48
1	171	648	1227	1521	1617	1740	1896	2088
2	132	273	363	468	528	564	594	606
3	33	66	90	99	108	120	135	144

Примітка: транспортування 1 – без зміни конструкції системи; 2 – з додатковою Х-подібною циркуляцією; 3 – з додатковою Х-подібною циркуляцією та подачею повітря в нижню частину вантажного танка.

Результати таблиці 4.9 узагальнені як номограма, що подана на рис. 4.11.

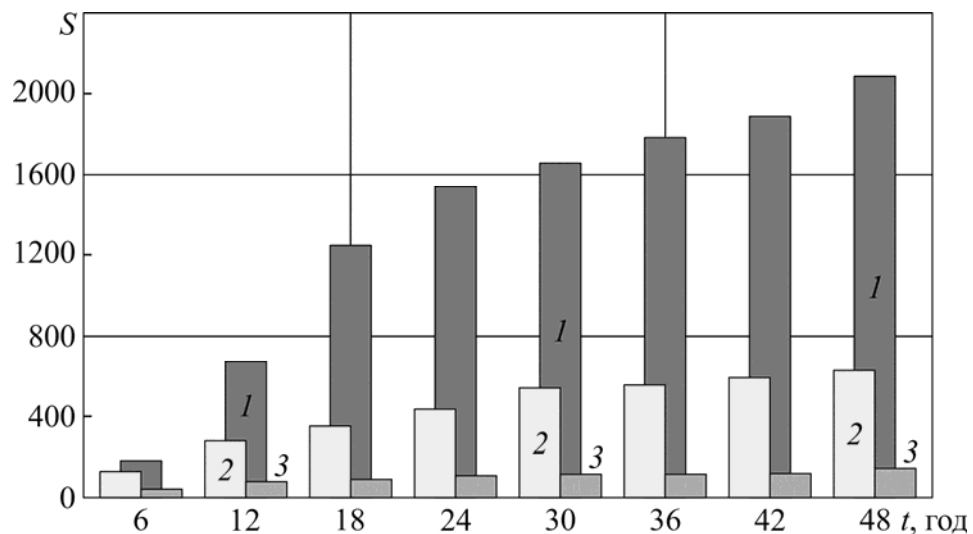


Рис. 4.11. Критерій оцінки седиментаційної стійкості БС залежно від часу для різних умов транспортування:

- 1 – без зміни конструкції системи; 2 – додаткова Х-подібна циркуляція;
3 – додаткова Х-подібна циркуляція та примусова подача повітря в нижню частину вантажного танка

Узагальнені результати експериментальних досліджень надані в таблиці 4.10.

Таблиця 4.10

Узагальнені результати експериментальних досліджень

Дедвейт судна типу PSV, тонн	Характеристики бурильної суспензії								Час транс- порту- вання, години
	густина, кг/м ³	зміна густини за глибиною вантажного танку, від $\rho_{\min}$ до $\rho_{\max}$, кг/м ³			седиментаційна стійкість, $\Delta\rho$, %				
		1	2	3	1	2	2		
4630	1240	982...1453	1235...1253	—	0,80...32,42	0,20...1,44	—	0...24	
4630	1323	1026...1670	1305...1377	—	3,64...38,78	3,64...5,52	—	0...24	
4410	1174	1073...1387	1162...1222	—	1,87...22,63	1,32...4,93	—	0...24	
4410	1295	988...1524	1275...1358	—	1,22...35,17	0,88...6,12	—	0...24	
6120	1232	1105...1463	1176...1282	1226...1263	0,24...24,47	0,32...8,27	0,24...2,93	0...36	
5850	1162	922...1322	1108...1255	1152...1202	0,17...30,26	0,17...11,71	0,17...4,16	0...48	
5850	1172	912...1278	1084...1185	1156...1181	0,34...28,64	0,25...8,52	0,34...2,12	0...48	

В таблиці: 1 – транспортування без удосконалення конструкції системи; 2 – удосконалення конструкції системи шляхом додаткової Х-подібної циркуляції; 3 – удосконалення конструкції системи шляхом додаткової Х-подібної циркуляції та примусової подачею повітря в нижню частину вантажного танка

4.4. Визначення оптимального варіанту встановлення додаткового обладнання під час удосконалення суднової системи збереження та циркуляції бурильної суспензії

Аналіз комплектації та функціонування суднової системи збереження та циркуляції БС, виконаний у 1-му розділі, показав її складність та насиченість різним обладнанням. При цьому основними вузлами цієї системи є вантажний насос, який надає енергію потоку БС, і магістральний трубопровід, яким БС перекачується з вантажного танка на нафтовидобувну платформу. Принципова схема розташування вантажних танків судна типу PSV, призначених для транспортування БС, та технологія виконання технологічного процесу приймання / видачки БС надана на рис. 4.12.

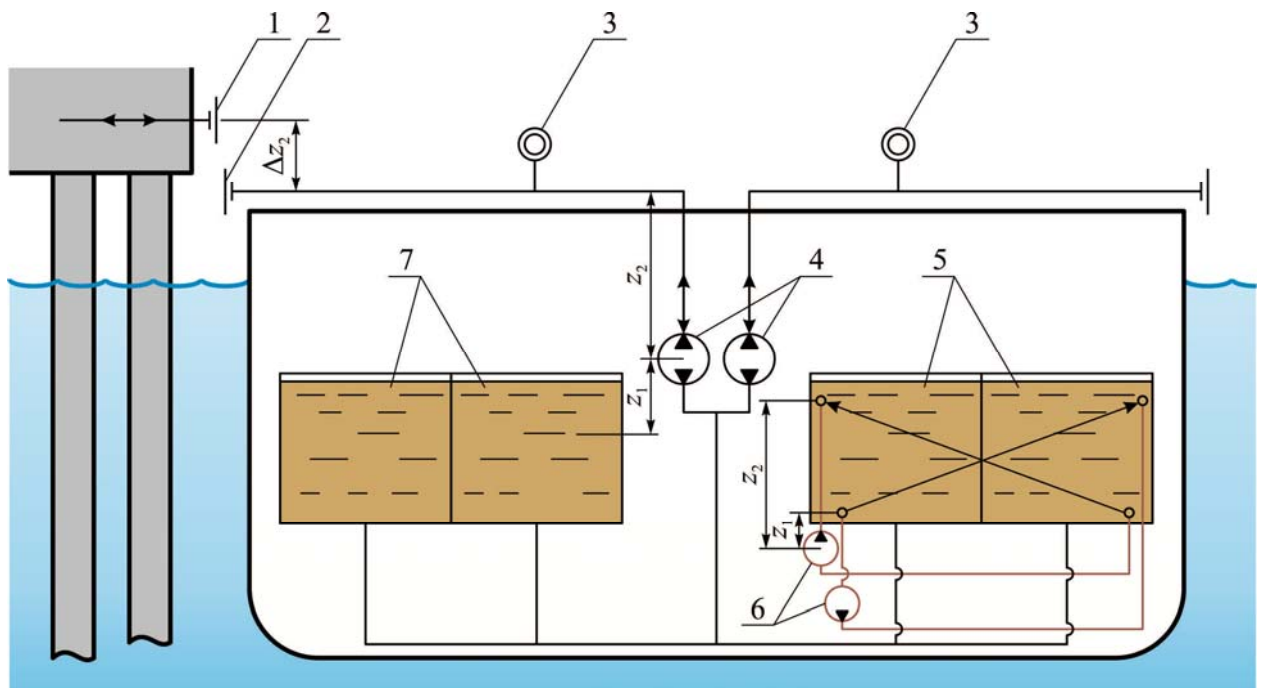


Рис. 4.12. Принципова схема розташування вантажних танків судна типу PSV, призначених для транспортування бурильної суспензії (фрагмент):
 1, 2 – фланець прийому / видачі БС на НВП та судні PSV; 3 – витратомір;
 4 – вантажні насоси; 5, 7 – вантажні танки; 6 – насоси примусової циркуляції БС

Транспортування БС забезпечується у вантажних танках 5 та 7, попарно розташованих з кожного борту судна. Завантаження БС в танки та її вивантаження на НВП здійснюється вантажними насосами 4. Як вказано в п. 4.2, підтримання реологічних та функціональних характеристик БС можливо шляхом модернізації суднової системи зберігання та циркуляції БС, що досягається додатковою постійною або періодичною циркуляцією БС між вантажними танками, що розташовані поруч один до одного. При цьому система транспортування БС додатково комплектується мобільними циркуляційними насосами 6 відповідно до схеми, що наведена на рис. 4.12. Таким чином, додаткову Х-подібну циркуляцію БС у вантажних танках забезпечують насоси 6, при цьому з нижньої частини одного з танків БС спрямовується на поверхню іншого [227, 228].

Транспортування БС (як будь-якої реальної рідини, що має в'язкість) супроводжується появою тертя, на подолання якого втрачається частина енергії, що передана БС. Ці втрати компенсуються напором, який створюється вантажним насосом. Відповідно до схеми, показаної на рис. 1, напір $H_{\text{тр}}$ для подачі БС складається з:

- статичної складової, яка не залежить від швидкості потоку та витрати

$$H_{\text{ст}} = g(z_1 + z_2) + \frac{P}{\rho}; \quad (4.2)$$

- гідравлічної складової, яка враховує гідравлічні опори всього магістрального трубопроводу та складається з сум місцевих опорів та опорів за довжиною всмоктувального та нагнітального трубопроводів

$$H_{\text{дин}} = \sum_{\text{вт}} \xi \frac{v_{\text{в}}^2}{2} + \lambda \frac{l_{\text{в}}}{d_{\text{в}}} \frac{v_{\text{в}}^2}{2} + \sum_{\text{нт}} \xi \frac{v_{\text{н}}^2}{2} + \lambda \frac{l_{\text{н}}}{d_{\text{н}}} \frac{v_{\text{н}}^2}{2};$$

$$H_{\text{тр}} = H_{\text{ст}} + H_{\text{дин}}.$$

У формулах складових напору:

z_1, z_2 – висота підйому рідини при всмоктуванні та нагнітанні, м;

P – тиск, створюваний вантажним насосом, Па;

ρ – густина БС, кг/м³;

v_B, v_H – швидкість руху БС у всмоктувальному та нагнітальному магістральному трубопроводі, м/с;

d_B, d_H – внутрішні діаметри всмоктувального та нагнітального трубопроводів, м;

l_B, l_H – довжини всмоктувального та нагнітального трубопроводів, м;

$\sum_{BT} \xi, \sum_{HT} \xi$ – суми коефіцієнтів місцевих опорів всмоктувального та нагнітального трубопроводів;

λ – коефіцієнт тертя у трубах.

Якщо з рівняння суцільності:

$$v_B \frac{\pi d_B^2}{4} = v_H \frac{\pi d_H^2}{4} = Q,$$

де Q – кількість БС (витрата), що перекачується вантажним насосом, м³/с, визначити

$$v_B = \left(\frac{d_B}{d_H} \right)^2 v_H; \quad v = \frac{4Q}{\pi d_H^2}$$

і підставити послідовно значення v_B та v_H у вираз для динамічної складової магістрального трубопроводу

$$H_{\text{дин}} = \left[\sum_{BT} \xi \left(\frac{d_B}{d_H} \right)^4 + \lambda \frac{l_B}{d_B} \left(\frac{d_B}{d_H} \right)^4 + \sum_{HT} \xi + \lambda \frac{l_H}{d_H} \right] \frac{v_H^2}{2},$$

загальний вираз для напору матиме вигляд (4.3)

$$\begin{aligned}
 H_{\text{тр}} &= g(z_1 + z_2) + \frac{P}{\rho} + \left[\sum_{\text{вт}} \xi \left(\frac{d_{\text{в}}}{d_{\text{н}}} \right)^4 + \lambda \frac{l_{\text{в}}}{d_{\text{в}}} \left(\frac{d_{\text{в}}}{d_{\text{н}}} \right)^4 + \sum_{\text{нт}} \xi + \lambda \frac{l_{\text{н}}}{d_{\text{н}}} \right] \frac{v_{\text{н}}^2}{2} = \\
 &= g(z_1 + z_2) + \frac{P}{\rho} + WQ^2,
 \end{aligned}
 \tag{4.3}$$

де

$$W = \frac{1}{2} \left(\frac{4}{\pi d_{\text{н}}^2} \right) \left[\sum_{\text{вт}} \xi \left(\frac{d_{\text{в}}}{d_{\text{н}}} \right)^4 + \lambda \frac{l_{\text{в}}}{d_{\text{в}}} \left(\frac{d_{\text{в}}}{d_{\text{н}}} \right)^4 + \sum_{\text{нт}} \xi + \lambda \frac{l_{\text{н}}}{d_{\text{н}}} \right].$$

Аналіз рівнянь (4.2) та (4.3) дозволяє зробити висновок, що управління гідравлічними втратами, що виникають у магістральному трубопроводі циркуляції БС, можливо здійснювати не тільки шляхом впливу на геометричні характеристики системи (діаметр і довжину), тиск вантажного насоса, але також за рахунок безпосередньої зміни осадку судна. Особливістю технологічного процесу транспортування БС суднами PSV є розбіжність у висотах фланців видачі / прийому БС, що знаходяться на НВП та на борту судна. Це пов'язано з різною висотою магістралей видачі / прийому БС на судні на НВП. Різниця у цій висоті (позначена як Δz_2 на рис. 4.12) збільшує статичну складову втрат напору. Видача БС з борту судна на НВП (у разі збільшення висоти її подачі на значення Δz_2) здійснюється шляхом підключення додаткових гнучких шлангів, що з'єднують фланці прийому / видачі БС на НВП та судні PSV (позиції 1 та 2 на рис. 4.12). Таким чином, видачу БС на НВП доцільно виконувати в завершенні технологічного процесу розвантаження судна PSV (в умовах, коли через зменшення дедвейту судна пропорційно зменшується осадка судна й підвищується висота надводного борту), що сприяє зменшенню значення висоти підйому рідини при нагнітанні (z_2 на рис. 4.12).

Аналіз статичної складової виразу (4.2) та особливостей експлуатації суден PSV також дозволяє зробити висновок, що найбільш раціональним місцем встановлення вантажних насосів є нижній рівень вантажного танка, тому що висоту підйому рідини при всмоктуванні (z_1 на рис. 4.12) неможливо змінити шляхом збільшення / зменшення дедвейту.

Встановлення додаткових насосів, що забезпечують примусову циркуляцію БС, повинно виконуватися відповідно до позицій 6 рис. 4.12.

Особливістю запропонованого способу установки насосів є негативне значення висоти підйому рідини при всмоктуванні (z_1 на рис. 4.12). При цьому (у зв'язку із забезпеченням процесу циркуляції за схемою нижня частина одного з вантажних танків – поверхня іншого вантажного танка, а також рівністю рівня БС у цих двох вантажних танках) виконується така наближена рівність $|-z_1| \approx |z_2|$, що суттєво зменшує значення статичної складової напору $H_{ст}$ та відповідне зниження загальних гідравлічних втрат $H_{тр}$. Додаткові магістралі, що з'єднують насоси циркуляції, можуть не мати арматури, що встановлюється перед всмоктуванням насосів, при цьому немає необхідності в установці подібної арматури на нагнітанні насосів (у зв'язку з тим, що циркуляція БС забезпечується безпосередньо на поверхню вантажного танка) [227, 228].

Аналогічна установка вантажних насосів у системі транспортування БС неможлива через необхідність не тільки видачі БС на НВП платформу, а й прийому БС у вантажні танки судна PSV з берегових установок або інших суден. Аналіз динамічної складової втрати напору при циркуляції БС на судах PSV свідчить про таке:

- найбільш раціональним місцем встановлення додаткових насосів (які забезпечують Х-подібну циркуляцію) є вантажний танк, при цьому потрібно забезпечити негативне значення висоти підйому рідини при всмоктуванні;
- додаткові магістралі (за якими забезпечується Х-подібна циркуляція) повинні мати мінімальну довжину, прямолінійну геометрію та мінімальну кількість додаткової арматури.

4.5. Висновки за розділом 4

Як результат досліджень, виконаних у розділі 4, визначимо наступне.

1. Експериментально встановлено, що запобігання розшаруванню бурильної суспензії та утворенню осаду з важких компонентів, якими вона легована, а також підтримання реологічних її характеристик (зокрема густина та седиментаційної стійкості) забезпечується удосконаленням системи за рахунок Х-подібної циркуляції бурильної суспензії між танками, що знаходиться поруч один до одного. При цьому з нижньої частини одного з цих вантажних танків бурильна суспензія спрямовується до верхньої частини іншого.

2. Експериментальні дослідження, що були проведені на судна типу PSV дедвейтом 4410, 4630, 5850, 6120 тонн під час транспортування бурильної суспензії з густиною 1174, 1295, 1240, 1323, 1162, 1172, 1232 кг/м³ протягом 24, 36, 48 годин виявили, що забезпечення додаткової Х-подібної циркуляції бурильної суспензії порівняно з її транспортуванням в системі зберігання та циркуляції без удосконалення призводить до:

- зменшення стратифікації густини за глибиною вантажного танку (як приклад, з діапазону значень 982...1453 кг/м³ до 1235...1253 кг/м³ та з діапазону значень 1073...1387 кг/м³ до 1162...1222 кг/м³);

- підвищення седиментаційної стійкості (як приклад, з діапазону значень 0,8...32,42 % до 0,2...1,44 % та з діапазону значень 1,87...22,63 % до 1,32...4,93 %).

Найбільші значення седиментаційної стійкості у випадку транспортування бурильної суспензії без удосконалення конструкції суднової системи зберігання та циркуляції за час транспортування 24 год досягає значення 38,78 %; у випадку вдосконалення системи за рахунок примусової Х-подібної циркуляції значення седиментаційної стійкості за цей проміжок часу не перевищує 5,52 %.

3. До більшої ефективності призводить комплексний метод, який полягає в одночасному забезпеченні примусової Х-подібної циркуляції бурильної суспензії та подачею повітря в нижню частину вантажного танка. Впровадження цього методу на суднах типу PSV дедвейтом 5850, 6120 тонн під час транспортування бурильної суспензії з густиною 1162, 1172, 1232 кг/м³ протягом 36, 48 годин виявили, що при цьому забезпечується:

- зменшення стратифікації густини за глибиною вантажного танку (як приклад, з діапазону значень 912...1278 кг/м³ до 1156...1181 кг/м³ та з діапазону значень 1105...1463 кг/м³ до 1226...1263 кг/м³);

- підвищення седиментаційної стійкості (як приклад, з діапазону значень 0,34...28,64 % до 0,34...2,12 % та з діапазону значень 0,24...24,47 кг/м³ до 0,24...2,93 кг/м³).

Найбільші значення седиментаційної стійкості у випадку транспортування бурильної суспензії без удосконалення конструкції суднової системи зберігання та циркуляції за час транспортування 48 год досягає значення 28,64 %; у випадку вдосконалення системи за рахунок одночасної примусової Х-подібної циркуляції та подачі повітря в нижню частину вантажного танка значення седиментаційної стійкості за цей проміжок часу не перевищує 2,12 %.

4. Найбільш раціональною ділянкою суднової системи збереження та транспортування бурильної суспензії, що відповідає умовам встановлення мобільного обладнання, яке забезпечує додаткову примусову циркуляцію бурильної суспензії, є нижній рівень вантажного танка. Це забезпечує негативне значення висоти підйому бурильної суспензії під час всмоктування, що суттєво зменшує значення статичної складової напору та відповідне зниження загальних гідравлічних втрат на технологічний процес перекачування бурильної суспензії. Додаткові магістралі, що з'єднують насоси циркуляції та вантажні танки, можуть не мати арматури, яка встановлюється перед всмоктуванням насосів. При цьому немає необхідності в установці подібної арматури на нагнітанні насосів (у зв'язку з тим, що

циркуляція бурильної суспензії забезпечується безпосередньо на поверхню вантажного танка).

Викачування бурильної суспензії на нафтовидобувну платформу доцільно виконувати в завершенні технологічного процесу розвантаження судна типу PSV (в умовах, коли через зменшення дедвейту судна пропорційно зменшується осадка судна і підвищується висота надводного борту), що сприяє зменшенню значення висоти підйому бурильної суспензії під час нагнітання.

5. Для впровадження додаткової Х-подібної циркуляції бурильної суспензії необхідно проведення перекомплектації системи. Виконання подібних робіт можливе лише за погодженням із судновласником, а в деяких випадках з Регістром або іншим класифікаційним товариством, яке здійснює нагляд за експлуатацією судна та його енергетичною установкою.

Розділ 5. УДОСКОНАЛЕННЯ СИСТЕМИ ЗБЕРІГАННЯ ТА ЦИРКУЛЯЦІЇ БУРИЛЬНОЇ СУСПЕНЗІЇ НА СУДНАХ ТИПУ PSV

П'ятий розділ присвячено розв'язанню головного завдання дисертаційного дослідження – удосконаленню системи зберігання та циркуляції бурильної суспензії під час її транспортування на судах типу PSV та визначення способу забезпечення її функціональних характеристик, при цьому необхідно:

- збільшити інтенсивність ламінарного потоку БС у системі її транспортування (з можливим створенням локальних зон турбулентного руху);
- зменшити рівень коагуляції важких компонентів, якими легована БС;
- забезпечити відбування процесу додаткової примусової циркуляції БС з найбільшою енергетичною ефективністю.

Забезпечення цих явищ, а також автоматичне управління їх перебігом сприятиме зниженню енергетичних втрат на процес зберігання, транспортування та видачі БС на НВП.

Основні результати розділу 5 висвітлені в джерелах [2], [13], [54], [95], [172], [225], [247].

5.1. Управління реологічними характеристиками бурильної суспензії під час її зберігання та циркуляції у вантажних танках судна типу PSV

Виконаний у 1-му розділі аналіз конструктивних особливостей судових систем зберігання та циркуляції БС дозволив встановити, що найбільші гідравлічні втрати у цих системах відбуваються на ділянках, що з'єднують вантажні танки та фланці видачі БС на бурову платформу. Причиною цього

(згідно з дослідженнями, результати яких наведені в розділах 3 та 4) є зниження седиментаційної стійкості БС, її розшарування та утворення осаду з важких компонентів, якими легована БС [172, 175, 229].

Додаткова примусова циркуляція БС, а також використання комплексного впливу на БС (шляхом одночасної примусової циркуляції та подачі повітря в нижню частину вантажного танка) сприяють зниженню стратифікації густини БС за глибиною вантажного танка, що призводить до стабілізації значення седиментаційної стійкості. При цьому система транспортування БС має містити у своєму складі:

- обладнання для циркуляції (яке активує ламінарний рух БС);
- обладнання для подачі повітря (при якому можливий локальний перехід ламінарного руху до турбулентного);
- засоби автоматичного регулювання седиментаційної стійкості БС під час її транспортування у вантажних танках суден типу PSV.

Це забезпечить:

- підтримку функціональних властивостей БС;
- мінімізацію утворення осаду важких компонентів, якими легована БС;
- зниження додаткового споживання енергії, пов'язаного з постійною роботою циркуляційних насосів, та скорочення часу перекачування БС із вантажних танків судна на НВП.

Комплекс попередніх досліджень з вивчення реологічних характеристик БС встановив виникнення стратифікації її густини по глибині танка. При цьому за рахунок розшарування БС відмінність в її густини на поверхні та дні танка може досягати 40 % [2, 225].

Як спосіб, що знижує стратифікацію густини БС, на судні типу PSV дедвейтом 5850 тонн використовувалась примусова циркуляція суспензії між вантажними танками (рис. 5.1). При цьому додаткові циркуляційні насоси 5 і 6 забезпечували перекачування БС з нижньої частини танків 3 і 4 у верхню частину танків 4 і 3 відповідно.

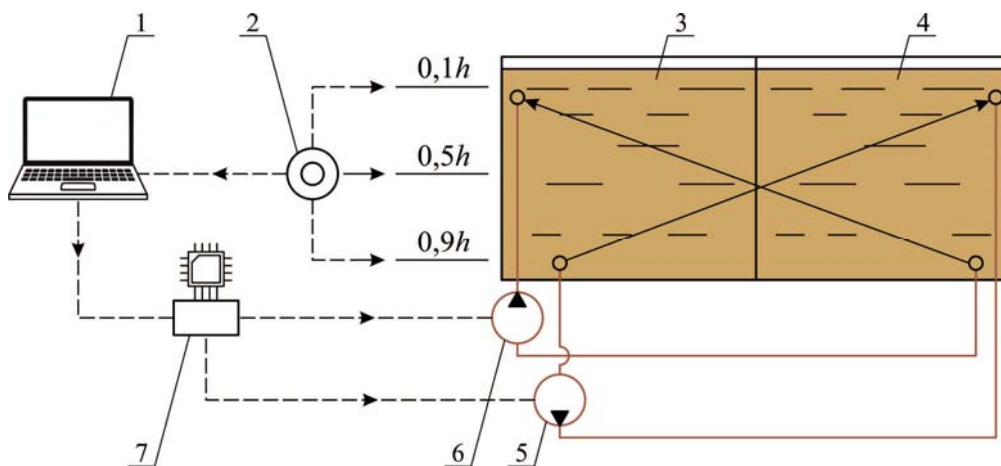


Рис. 5.1. Управління процесом додаткової циркуляції бурильної суспензії у вантажних танках судна: 1 – ноутбук; 2 – ареометр; 3, 4 – вантажні танки для перевезення бурильної суспензії; 5, 6 – додаткові циркуляційні насоси; 7 – мікроконтролер

Перевезення БС здійснювалося в чотирьох вантажних танках, розташованих попарно з кожного борту судна (аналогічно схемі, наведеній на рис. 4.12). Удосконалення системи виконувалася тільки для однієї групи танків, розташованих з одного борту судна (рис. 5.1). Комплектація системи іншої групи танків не змінювалася. Технологія робіт з переобладнання системи та контроль їх виконання були узгоджені з технічним департаментом компанії, яка забезпечувала менеджмент судна [228, 230].

На відміну від попередніх досліджень, суднова система транспортування БС додатково комплектувалася системою автоматичного регулювання (САР) густини БС, до складу якої входили ноутбук 1 та мікроконтролер 7 (рис. 5.1). Функціональні характеристики та можливості сучасних мікроконтролерів дозволяють виконувати управління будь-якими тепловими, механічними та енергетичними процесами, що відбуваються у СЕУ та СПК [231-233].

Аналогічно послідовності, викладеної в п. 3.4, зміна структурного стану БС оцінювалося шляхом вимірювання її густини на рівнях, що відповідали 10, 50 і 90 % загальної глибини танка. Для вимірювання густини використовувався занурювальний ареометр Anton Paar DMA35 Tag&Log (позиція 2 на рис. 5.1), характеристики якого наведені у п. 3.3. На кожному з

рівнів виконувалося по шість вимірювань (відповідно до технології, наведеної в п. 3.4 і показаної на рис. 3.1), отримані таким чином значення усереднювалися. Також усереднювалися значення густини на однаковому рівні (0,1*h*, 0,5*h*, 0,9*h* на рис. 5.1) у попарно розташованих з кожного борту судна танках (у двох із яких транспортування БС виконувалося без примусової циркуляції, у двох – із циркуляцією). Цикл вимірювань густини та подальша фіксація отриманих значень у програмі ноутбука (позиція 1 на рис. 5.1) не перевищували 10 хв. Перехід судна дозволяв виконувати дослідження протягом 48 годин з інтервалом між вимірами 6 годин.

Температура БС (яка одночасно із густиною вимірювалася ареометром Anton Paar DMA35 Tag&Log) під час досліджень змінювалася в діапазоні 17...18°C, що не наводило суттєвого впливу на її коефіцієнта лінійного розширення та густину. Крен та диферент судна під час переходу до НВП дозволяли вважати висоту рівня БС у вантажному танку постійною.

Седиментаційна стійкість БС оцінювалася як зміна вертикальної густини поблизу поверхні та нижньої частини вантажного танка:

$$\Delta\rho = \frac{\rho_{90} - \rho_{10}}{\rho_{90}} \cdot 100\%, \quad (5.1)$$

де ρ_{90} , ρ_{10} – густина БС на рівнях 0,9*h* та 0,1*h* відповідно (рис. 5.1).

Великі значення $\Delta\rho$ свідчать за збільшення кількості осаду легованих елементів, більш високий ступінь розшарування БС та зниження її седиментаційної стійкості.

Наразі не існує рекомендацій щодо підтримки значення седиментаційної стійкості БС [117, 234-236]. Ця величина була обрана, що дорівнювала 7 % з урахуванням досвіду експлуатації судових систем перевезення БС та результатів попередніх досліджень [2, 13, 54, 95]. Таким чином, у разі коли значення седиментаційної стійкості перевищувало 7 %, САР забезпечувала Х-подібну циркуляцію БС між сусідніми танками. Циркуляція припинялася, коли значення седиментаційної стійкості не перевищувало 2 %

Значення седиментаційної стійкості було вхідним параметром контролера 7, який забезпечував увімкнення / вимкнення насосів примусової циркуляції 5 і 6 (рис. 5.1). Результати досліджень наведено у таблиці 5.1.

Таблиця 5.1

Густина бурильної суспензії, ρ , кг/м³, для різних умов проведення експерименту

Рівень в танку	Час транспортування, години								
	0	6	12	18	24	30	36	42	48
транспортування без зміни конструкції системи									
0,1h	1185	1182	1172	1160	1151	1136	1118	1101	1092
0,5h	1185	1198	1225	1241	1258	1283	1316	1326	1342
0,9h	1187	1212	1258	1298	1335	1358	1381	1402	1418
транспортування з додатковою Х-подібною циркуляцією та автоматичним регулюванням седиментаційної стійкості									
0,1h	1186	1183	1171	1178	1183	1177	1162	1178	1182
0,5h	1186	1196	1224	1192	1209	1218	1224	1191	1188
0,9h	1188	1212	1256	1206	1197	1238	1255	1212	1191

Результати, що наведені в таблиці 5.1, свідчать за зменшення неузгодженості значень густини БС за глибиною вантажного танку під час транспортування з додатковою Х-подібною циркуляцією та автоматичним регулюванням седиментаційної стійкості порівняно зі звичайним способом транспортування. При цьому зменшення цієї неузгодженості характерно за глибиною вантажного танку та за часом транспортування БС.

Седиментаційна стійкість БС розраховувалася за виразом (5.1), її значення для різних способів транспортування наведено у таблиці 5.2.

Графічні залежності, що відображають зміну густини та седиментаційної стійкості БС, наведено на рис. 5.2.

Таблиця 5.2

Седиментаційна стійкість бурильної суспензії, $\Delta\rho$, %

Час, години	Транспортування без зміни конструкції системи	Транспортування з додатковою Х-подібною циркуляцією та автоматичним регулюванням седиментаційної стійкості
0	0,17	0,17
6	2,54	2,45
12	7,34	7,26
18	11,89	2,38
24	15,99	1,18
30	19,54	5,18
36	23,52	8,01
42	27,34	2,89
48	29,85	0,76

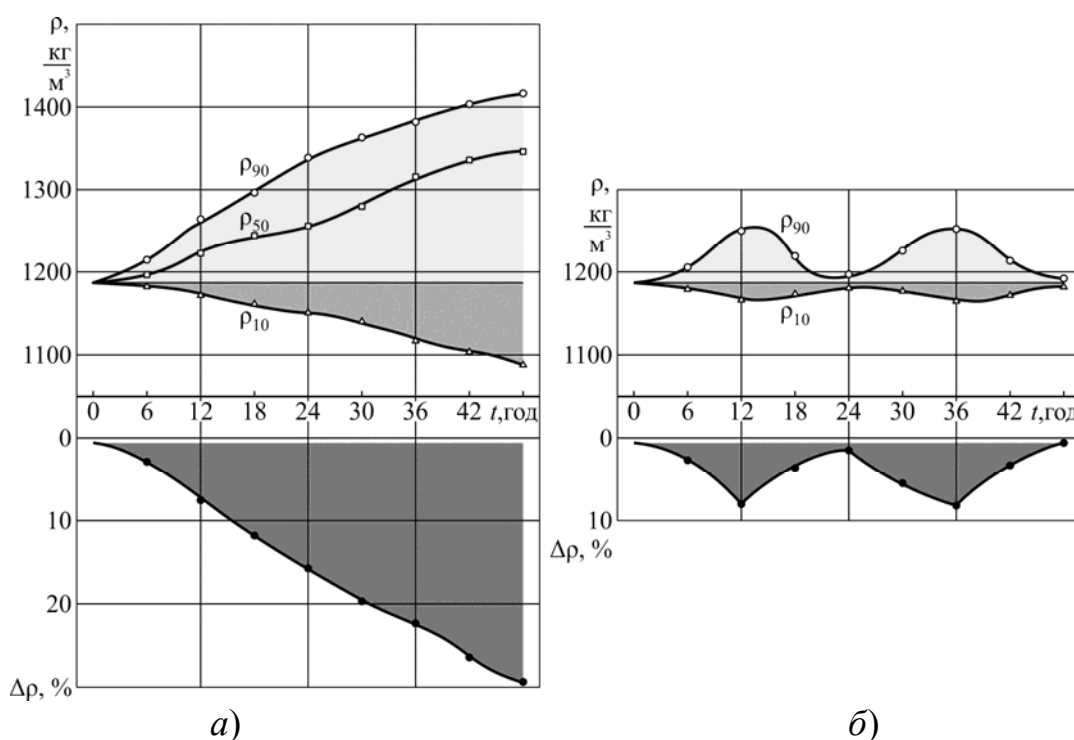


Рис. 5.2. Зміна густини, ρ , та седиментаційної стійкості, $\Delta\rho$, БС
залежно від часу:

а – транспортування без удосконалення конструкції;

б – транспортування з додатковою Х-подібною циркуляцією та
автоматичним регулюванням седиментаційної стійкості

Програмований мікроконтролер (позиція 7 на рис. 5.1) був налаштований таким чином, що під час досягнення седиментаційної стійкості значення 7 % відбувалося увімкнення додаткових циркуляційних насосів (позиції 5 та 6 на рис. 5.1). Примусова циркуляція сприяла зниженню розшарування суспензії бурильної і відновленню її однорідності. При цьому відбувалося «вирівнювання» вертикальної густини БС ρ (рис. 5.2, б та таблиця 5.1) та зниження її седиментаційної стійкості $\Delta\rho$ (рис. 5.2, б та таблиця 5.2). При досягненні седиментаційної стійкості БС величини 2 % програмований мікроконтролер (позиція 7 на рис. 5.1) здійснював вимикання додаткових циркуляційних насосів (позиції 5 та 6 на рис. 5.1) [237]. Це забезпечувало зниження витрати енергії на їхню роботу та підвищувало конструктивний коефіцієнт енергетичної ефективності судна.

Результати, які наведені у таблиці 5.2 та на рис. 5.2 свідчать, що зміна густини та седиментаційної стійкості БС під час її транспортування у вантажних танках суден типу PSV відбувається за експонентним законом. Максимальне збільшення густини (і відповідне тяжіння БС) відповідає нижній частині вантажного танка (глибині 90 %). Мінімальне зниження густини відповідає шару БС, що знаходиться на поверхні та у верхній частині вантажного танка (на глибині 10 %).

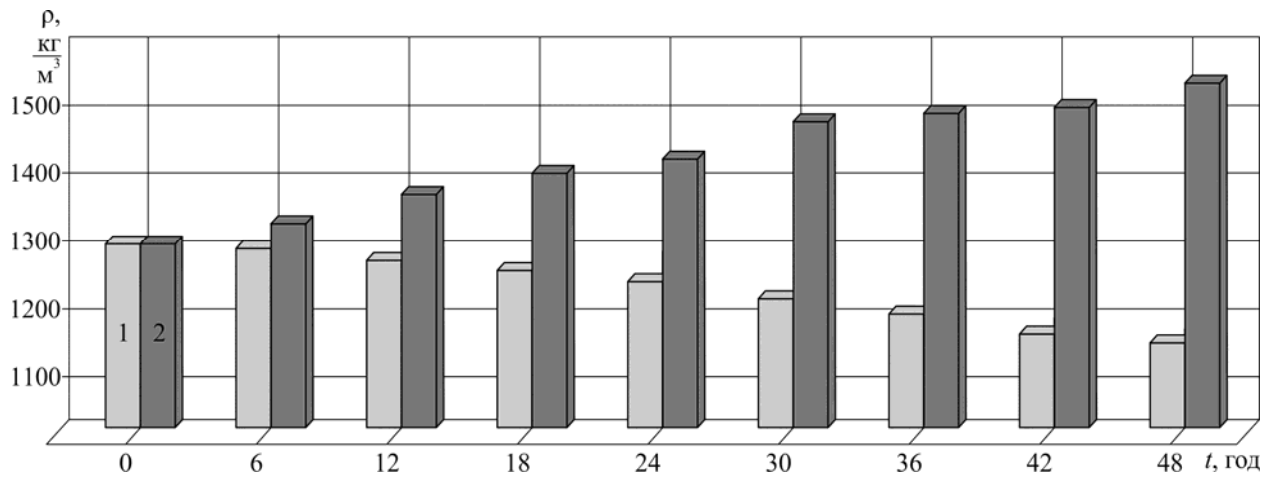
Стратифікація густини БС по глибині танка сприяє зниженню її седиментаційної стійкості. У разі транспортування БС без зміни конструкції системи за проміжок часу 6...48 годин відбувається зниження її седиментаційної стійкості на 2,54...29,85 %. Підтримка у вантажних танках примусової Х-подібної циркуляції з періодичним увімкненням / вимкненням додаткових циркуляційних насосів знижує стратифікацію густини по глибині вантажного танка. При цьому способі транспортування зниження седиментаційної стійкості БС за такий самий проміжок часу становить 0,17...8,01 %.

Аналогічні дослідження проводилися під час перевезення БС з іншими характеристиками. Їхні результати наведені в таблиці 5.3, а також відображені на номограмах рис. 5.3 та 5.4.

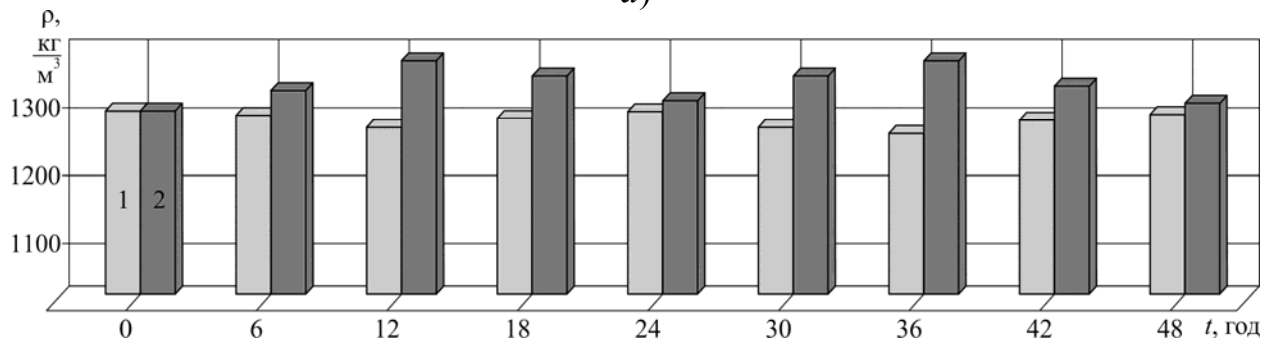
Таблиця 5.3

Зміна густини (ρ , кг/м³) та седиментаційної стійкості бурильної суспензії ($\Delta\rho$, %) по глибині вантажного танка залежно від часу та способу її транспортування

	Час транспортування, години								
	0	6	12	18	24	30	36	42	48
	Транспортування без удосконалення системи								
Густина (ρ , кг/м ³) на глибині: 0,1h	1295	1292	1278	1265	1242	1228	1207	1182	1163
0,5h	1295	1298	1325	1342	1362	1385	1402	1419	1447
0,9h	1298	1329	1378	1396	1419	1438	1468	1488	1524
Седиментаційна стійкість ($\Delta\rho$, %) за глибиною танка	0,23	2,86	7,82	10,36	14,25	17,10	21,62	25,89	31,04
	Транспортування з додатковою Х-подібною циркуляцією та автоматичним регулюванням седиментаційної стійкості								
Густина (ρ , кг/м ³) на глибині: 0,1h	1295	1293	1281	1288	1293	1285	1268	1282	1293
0,5h	1296	1300	1328	1312	1303	1325	1348	1327	1298
0,9h	1299	1328	1381	1351	1315	1348	1377	1335	1304
Седиментаційна стійкість ($\Delta\rho$, %) за глибиною танка	0,31	2,71	7,81	4,89	1,70	4,90	8,60	4,13	0,85



а)



б)

Рис. 5.3. Зміна густини бурильної суспензії залежно від часу:

а – транспортування без удосконалення конструкції системи;

б – транспортування з додатковою Х-подібною циркуляцією та автоматичним регулюванням седиментаційної стійкості;

1 – густина на глибині 0,1h; 2 – густина на глибині 0,9h

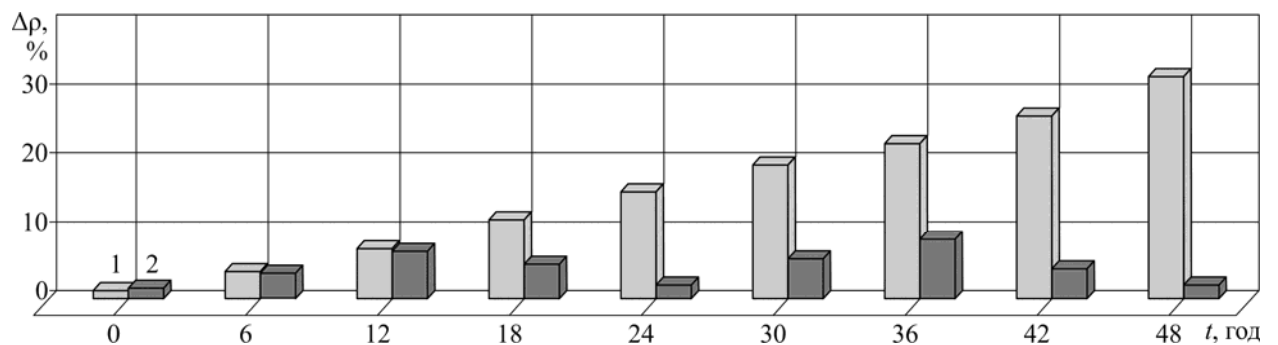


Рис. 5.4. Седиментаційна стійкість бурильної суспензії за глибиною вантажного танка:

1 – транспортування без удосконалення конструкції системи,

2 – транспортування з додатковою Х-подібною циркуляцією та автоматичним регулюванням седиментаційної стійкості

Номограми рис. 5.3, *а, б* відображають зміну густини БС за глибиною вантажного танка. Чим більша різниця у висоті стовпчиків 1 і 2 цих номограм, тим більше розшарування БС. Номограма рис. 5.4 характеризує зміну седиментаційної стійкості БС. У разі транспортування БС без удосконалення конструкції системи латентне розшарування БС призводить до експоненційного зниження її седиментаційної стійкості. Транспортування БС із додатковою Х-подібною циркуляцією та автоматичне регулювання седиментаційної стійкості під час досягнення значення 7 % сприяє підвищенню дисперсності БС та вирівнюванню її густини по глибині вантажного танка.

5.2. Автоматичне підтримання функціональних характеристик бурильної суспензії під час її транспортування суднами типу PSV

Можливість автоматичного управління процесами одночасного забезпечення циркуляції та аеродинамічного на БС виконувалося на судні типу PSV дедвейтом 5850 тонн. При цьому забезпечення циркуляції та подача повітря в нижню частину вантажного танка здійснювалися відповідно до схеми, наведеної на рис. 4.6.

У даному випадку САР отримувала інформацію про густину БС на різній висоті вантажного танка та за допомоги мікроконтролера здійснювала керуючий вплив на мобільні циркуляційні насоси (позиція 3 на рис. 4.3, *а, б*) та повітряний компресор (позиція 5 на рис. 4.3, *б*). Це забезпечувало автоматичне регулювання густини БС у «парних» вантажних танках (двох, де проводилася додаткова циркуляція БС – позиції 2 на рис. 4.6, та двох, де проводилася циркуляція БС з одночасною подачею повітря – позиції 6 на рис. 4.6).

Автоматичне підтримання функціональних характеристик БС під час її транспортування суднами PSV виконувалося замкненою системою управління [238, 239]. Структурна комплектація САР забезпечувала виконання технологічних процесів, що виконуються спеціалізованими суднами PSV [240, 241]. Схема управляючої дії на елементи удосконаленої системи транспортування БС наведена на рис. 5.5.

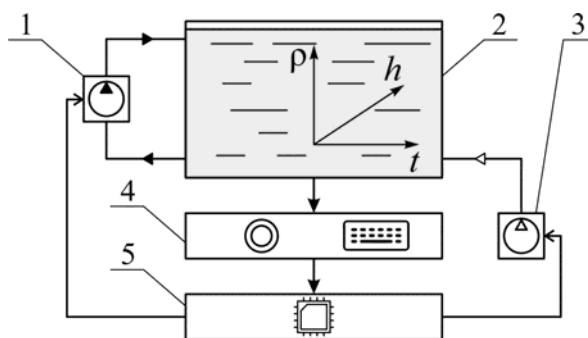


Рис. 5.5. Автоматичне підтримання функціональних характеристик БС під час її транспортування суднами PSV:

- 1 – блок забезпечення додаткової Х-подібної циркуляції; 2 – вантажний танк;
3 – блок забезпечення аеродинамічного впливу; 4 – блок контролю та реєстрації; 5 – мікроконтролер

Як об'єкт регулювання приймалися реологічні характеристики БС, що транспортуються у вантажному танку 2 (її густина та седиментаційна стійкість). Зміна густини ρ по глибині вантажного танка h протягом часу експерименту t здійснювалося блоком контролю та реєстрації 4. Мікроконтролер 5 здійснював керуючу дію на блок забезпечення додаткової Х-подібної циркуляції 1 та блок забезпечення аеродинамічного впливу 3.

Під час проведення досліджень судно PSV виконувало транспортування БС густиною 1355 кг/м^3 .

У разі перевищення відхилення седиментаційної стійкості за глибиною танка (на поверхні та рівні, що відповідає 90 % глибини) понад 7 %, мікроконтролери САР забезпечували увімкнення мобільних циркуляційних насосів та подачу повітря в донну частину вантажного танка. При цьому збільшувалася інтенсивність ламінарного потоку БС, також з'являлися

локальні зони її турбулентного руху [242, 243]. Це сприяло зниженню відхилення седиментаційної стійкості БС. У момент, коли значення седиментаційної стійкості досягало 2 %, САР вимикала мобільні циркуляційні насоси та припиняла подачу повітря у вантажні танки.

За результатами проведених досліджень побудовано залежність густини БС за різних умов її транспортування (рис. 5.6).

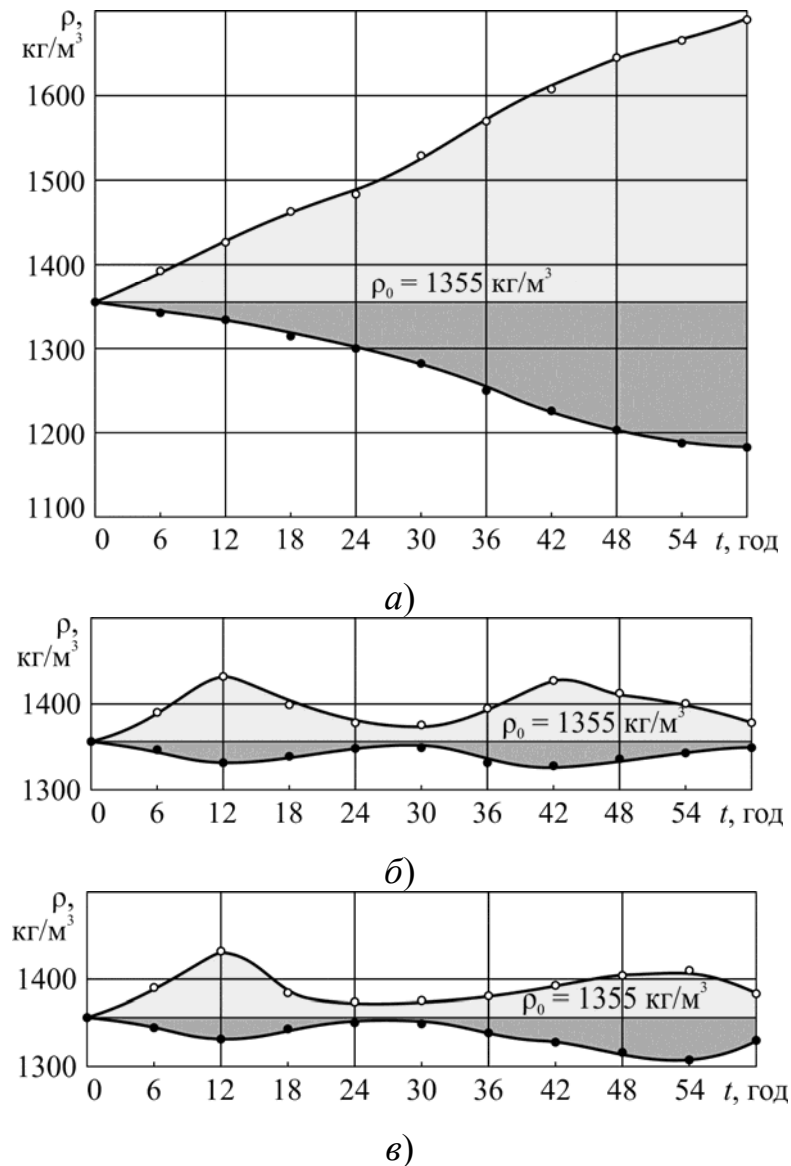


Рис. 5.6. Зміна густини БС у часі для різних способів транспортування:

- а* – транспортування без удосконалення конструкції системи;
- б* – транспортування з додатковою Х-подібною циркуляцією та автоматичним регулюванням седиментаційної стійкості;
- в* – транспортування з додатковою Х-подібною циркуляцією з одночасною подачею повітря в нижню частину вантажного танка та автоматичним регулюванням седиментаційної стійкості

Вимірювання густини (відповідно до схеми рис. 4.6) виконувались на поверхні вантажного танка та на рівнях, що відповідають 30, 60 і 90 % його глибини. На рис. 5.6 для кращої візуалізації наведено залежності тільки для значень густини, виміряної на поверхні ρ_0 та на глибині 90 % – ρ_{90} .

Значення седиментаційної стійкості БС за різних умов транспортування для виконаної серії експериментальних досліджень наведено в таблиці 5.4.

Таблиця 5.4

Седиментаційна стійкість БС за різних умов її транспортування

Час, t , години	Седиментаційна стійкість, $\Delta\rho$, %		
	1	2	3
0	0,15	0,15	0,07
6	3,73	3,43	3,31
12	7,21	7,35	7,05
18	11,55	4,17	2,46
24	14,37	2,52	1,39
30	19,50	1,70	1,96

Час, t , години	Седиментаційна стійкість, $\Delta\rho$, %		
	1	2	3
36	26,04	4,49	3,69
42	31,38	7,07	5,30
48	37,10	4,90	6,41
54	39,91	3,36	7,22
60	42,09	1,67	2,69

У таблиці 5.2: 1 – транспортування без удосконалення конструкції системи 2 – з додатковою Х-подібною циркуляцією та автоматичним регулюванням седиментаційної стійкості; 3 – з додатковою Х-подібною циркуляцією з одночасною подачею повітря в донну частину вантажного танка та автоматичним регулюванням седиментаційної стійкості.

Аналізуючи результати, наведені в таблиці 5.4, зазначимо, що у разі транспортування БС без удосконалення конструкції системи її седиментаційна стійкість протягом 60 годин знижується до 42,09 %.

За аналогічний проміжок часу за умови удосконалення системи зберігання та циркуляції БС зниження седиментаційної стійкості не 7,5 %.

Зміна седиментаційної стійкості у разі удосконалення системи транспортування БС показано на рис. 5.7. Зазначимо, що значення седиментаційної стійкості на рис. 5.7, *а* та 5.7, *б*, побудовані в різних масштабах за віссю ординат.

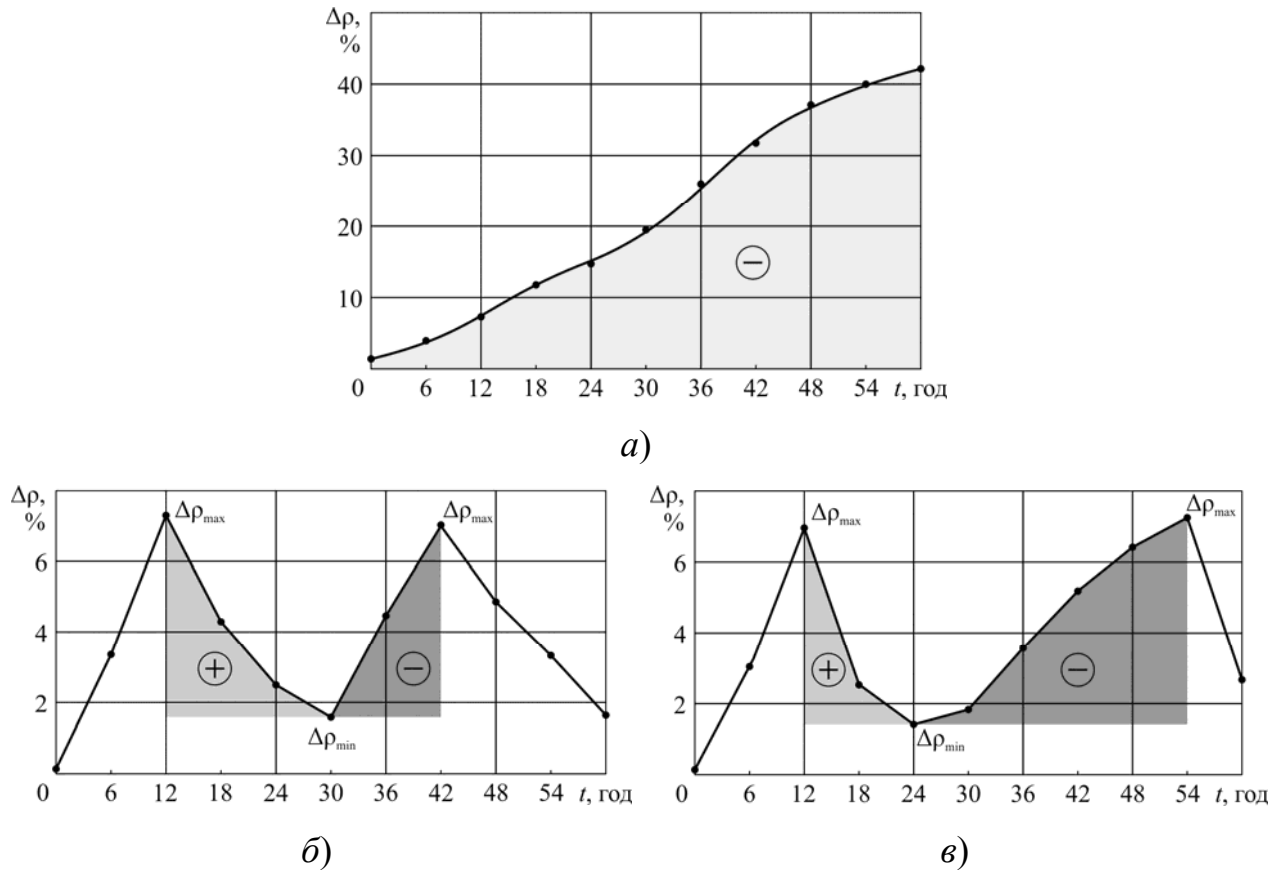


Рис. 5.7. Зміна седиментаційної стійкості у часі за різних умов транспортування БС:

а – без удосконалення системи; *б* – з додатковою Х-подібною циркуляцією та автоматичним регулюванням седиментаційної стійкості; *в* – з додатковою Х-подібною циркуляцією з одночасною подачею повітря в нижню частину танка та автоматичним регулюванням седиментаційної стійкості

Введемо ще один показник, що характеризує дисперсність БС по глибині вантажного танка – **швидкість зміни седиментаційної стійкості** – $V_{\Delta\rho}$, під якою розумітимемо відношення різниці сусідніх екстремумів залежності $\Delta\rho=f(t)$, до проміжку часу, протягом якого ці екстремуми

фіксувалися (рис. 5.7, б, в). При цьому, за позитивне прийматимемо зміну седиментаційної стійкості від більшого значення до меншого (що відповідає зменшенню розшарування БС та збільшенню її однорідності); за негативне – зміну седиментаційної стійкості від меншого значення до більшого (що відповідає збільшенню розшарування БС та зменшенню її однорідності).

Для залежностей, що представлені на рис. 5.7:

- під час транспортування з додатковою Х-подібною циркуляцією та автоматичним регулюванням седиментаційної стійкості

$$V_{\Delta\rho}^+ = \frac{|\Delta\rho_{30} - \Delta\rho_{12}|}{30 - 12}, \quad V_{\Delta\rho}^- = \frac{|\Delta\rho_{42} - \Delta\rho_{30}|}{42 - 30} \quad (5.2)$$

- під час транспортування з додатковою Х-подібною циркуляцією з одночасною подачею повітря в нижню частину вантажного танка та автоматичним регулюванням седиментаційної стійкості

$$V_{\Delta\rho}^+ = \frac{|\Delta\rho_{24} - \Delta\rho_{12}|}{24 - 12}, \quad V_{\Delta\rho}^- = \frac{|\Delta\rho_{54} - \Delta\rho_{24}|}{54 - 24}. \quad (5.3)$$

Відповідно до запропонованого визначення, швидкість зміни седиментаційної стійкості має розмірність $\left[\frac{\%}{\text{час}} \right]$. Однак у подальшому (для зручності візуалізації) представлятиме цю величину в безрозмірному вигляді.

Підставивши у вирази (5.2) та (5.3) відповідні значення з таблиці 5.4, отримаємо:

- під час транспортування з додатковою Х-подібною циркуляцією та автоматичним регулюванням седиментаційної стійкості

$$V_{\Delta\rho}^+ = \frac{|1,7 - 7,35|}{30 - 12} = 0,31, \quad V_{\Delta\rho}^- = \frac{|7,07 - 1,7|}{42 - 30} = 0,45;$$

• під час транспортування з додатковою Х-подібною циркуляцією з одночасною подачею повітря в нижню частину вантажного танка та автоматичним регулюванням седиментаційної стійкості

$$V_{\Delta\rho}^+ = \frac{|1,39 - 7,05|}{24 - 12} = 0,47, \quad V_{\Delta\rho}^- = \frac{|7,22 - 1,39|}{54 - 24} = 0,19.$$

Під час транспортування БС без удосконалення конструкції системи швидкість зміни седиментаційної стійкості розраховується за виразом

$$V_{\Delta\rho}^- = \frac{|\Delta\rho_{60} - \Delta\rho_0|}{60}. \quad (5.4)$$

Підставивши в (5.4) відповідні значення таблиці 5.1, отримаємо:

$$V_{\Delta\rho}^- = \frac{|42,09 - 0,15|}{60} = 0,70.$$

Враховуючи отримані значення, ефективність способу транспортування БС можна оцінити за номограмою, наведеною на рис. 5.8.

Підкреслимо, що введений показник «швидкість зміни седиментаційної стійкості» є додатковим критерієм оцінювання якості транспортування БС та ефективності виконаного удосконалення системи збереження та циркуляції БС на суднах типу PSV. Відхилення цього показнику для випадку транспортування БС без удосконалення конструкції діється лише в негативний бік (що пов'язано з постійним зменшенням седиментаційної стійкості та поступовим розшаруванням БС). Під час удосконалення системи збереження та циркуляції БС шляхом створення її додаткової примусової Х-подібною відхилення швидкості зміни седиментаційної стійкості відбувається не лише в негативний бік, але ще й у позитивний напрямок (що зумовлюється вирівнюванням густини та седиментаційної стійкості БС під час додаткової Х-подібною циркуляції).

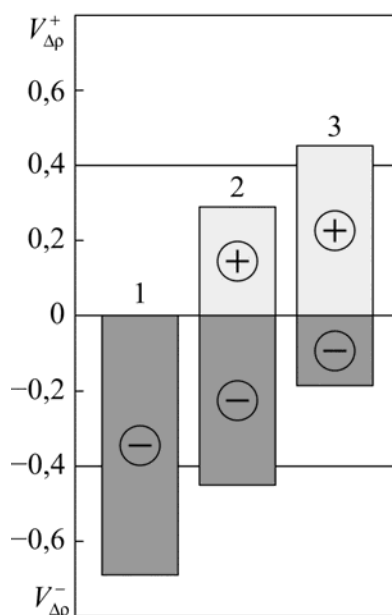


Рис. 5.8. Оцінка ефективності способів транспортування БС:

1– без удосконалення системи; 2 – з додатковою Х-подібною циркуляцією та автоматичним регулюванням седиментаційної стійкості; 3 – з додатковою Х-подібною циркуляцією з одночасною подачею повітря в нижню частину танка та автоматичним регулюванням седиментаційної стійкості

Також до позитивного напрямку здійснюється відхилення швидкості зміни седиментаційної стійкості за умови додаткової Х-подібної циркуляції БС з одночасною подачею повітря в нижню частину танка.

Аналіз номограм, наведених на рис. 5.8, дозволяє зробити висновок, що найбільш ефективним способом удосконалення системи зберігання та циркуляції БС на судах типу PSV є такий, при якому відхилення швидкості зміни седиментаційної стійкості в позитивному напрямку перевищує подібне відхилення в негативному напрямку.

З метою розширення масиву експериментальних даних та оцінки можливості застосування запропонованої технології перевезення БС та вдосконалення системи зберігання та циркуляції БС, дослідження були продовжені з БС, що має густину 1322 кг/м^3 . Тривалість проведення досліджень становила 36 годин. Дослідження виконувались відповідно до схеми, наведеної на рис. 5.5.

У таблиці 5.5 наведено залежність седиментаційної стійкості БС від часу та способу її транспортування / удосконалення системи збереження та циркуляції.

Таблиця 5.5

Седиментаційна стійкість БС за різних умов її транспортування

Час, t , години	Седиментаційна стійкість, $\Delta\rho$, %			Час, t , години	Седиментаційна стійкість, $\Delta\rho$, %		
	1	2	3		1	2	3
0	0,15	0,08	0,08	24	19,55	1,91	1,57
6	5,19	5,43	5,15	30	23,53	5,09	3,84
12	8,19	7,81	7,30	36	25,75	7,45	4,92
18	16,01	5,30	3,24	42	27,32	3,77	7,04

У таблиці 5.2: 1 – транспортування без удосконалення конструкції системи 2 – з додатковою Х-подібною циркуляцією та автоматичним регулюванням седиментаційної стійкості; 3 – з додатковою Х-подібною циркуляцією з одночасною подачею повітря в донну частину вантажного танка та автоматичним регулюванням седиментаційної стійкості

За даними таблиці 5.5 побудовані графічні залежності, що подані на рис. 5.9.

Ефективність системи зберігання та циркуляції БС на суднах типу PSV з достатнім для цієї системи та процесу транспортування БС рівнем точності також можливо оцінити за площею $S_{\Delta\rho}$ під кривою $\Delta\rho=f(t)$

$$S_{\Delta\rho} \approx \frac{\Delta\rho_{\max} - \Delta\rho_{\min}}{2} \Delta t;$$

де $\Delta\rho_{\max}$, $\Delta\rho_{\min}$ – максимальне та мінімальне значення седиментаційної стійкості, %;

Δt – час між $\Delta\rho_{\max}$ та $\Delta\rho_{\min}$.

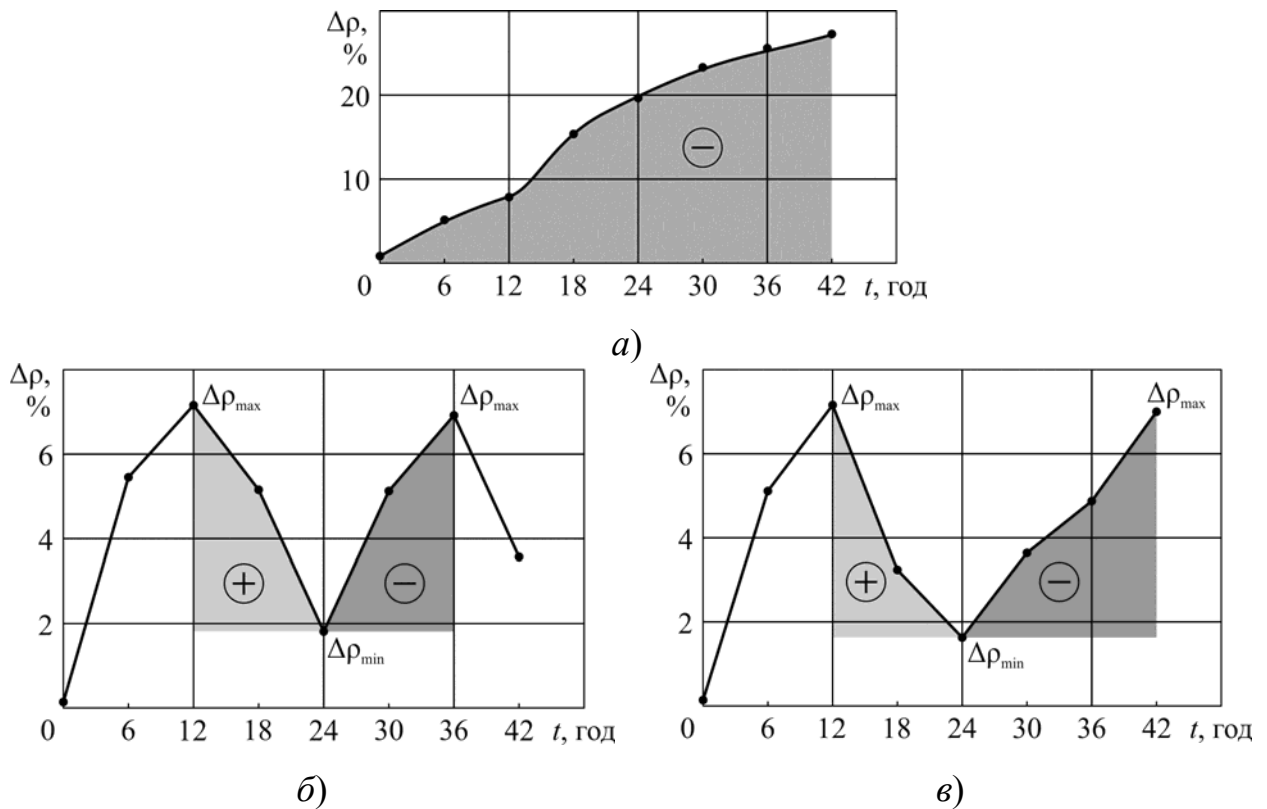


Рис. 5.9. Зміна седиментаційної стійкості у часі за різних умов транспортування БС: *a* – без удосконалення конструкції системи; *б* – з додатковою Х-подібною циркуляцією та автоматичним регулюванням седиментаційної стійкості; *в* – з додатковою Х-подібною циркуляцією з одночасною подачею повітря в донну частину вантажного танка та автоматичним регулюванням седиментаційної стійкості

Для залежностей, що наведені на рис. 5.9:

- для випадку *a* (лише негативна складова)

$$S_{\Delta\rho} \approx \frac{\Delta\rho_{42} - \Delta\rho_0}{2} \cdot 42 = \frac{27,32 - 0,15}{2} \cdot 42 = 570,57 \text{ \%} \cdot \text{год};$$

- для випадку *б*:

негативна складова

$$S_{\Delta\rho} \approx \frac{\Delta\rho_{12} - \Delta\rho_0}{2} \cdot 12 + \frac{\Delta\rho_{36} - \Delta\rho_{24}}{2} \cdot 12 = 79,62 \text{ \%} \cdot \text{год};$$

позитивна складова

$$S_{\Delta\rho} \approx \frac{\Delta\rho_{12} - \Delta\rho_{24}}{2} \cdot 12 + \frac{\Delta\rho_{36} - \Delta\rho_{42}}{2} \cdot 6 = 46,44 \text{ \%} \cdot \text{год};$$

• для випадку в:

негативна складова

$$S_{\Delta\rho} \approx \frac{\Delta\rho_{12} - \Delta\rho_0}{2} \cdot 12 + \frac{\Delta\rho_{42} - \Delta\rho_{24}}{2} \cdot 18 = 135,87 \text{ \%} \cdot \text{год};$$

позитивна складова

$$S_{\Delta\rho} \approx \frac{\Delta\rho_{12} - \Delta\rho_{24}}{2} \cdot 12 = 34,38 \text{ \%} \cdot \text{год};$$

в наведених виразах $\rho_0, \rho_{12}, \rho_{24}, \rho_{36}, \rho_{42}$ – густина, що відповідає часу 0, 12, 24, 36, 42 годин (таблиця 5.5)

На рис. 5.10 наведені номограми швидкості зміни седиментаційної стійкості, розрахунок яких виконувався за виразами, аналогічними виразам (5.2)-(5.4).

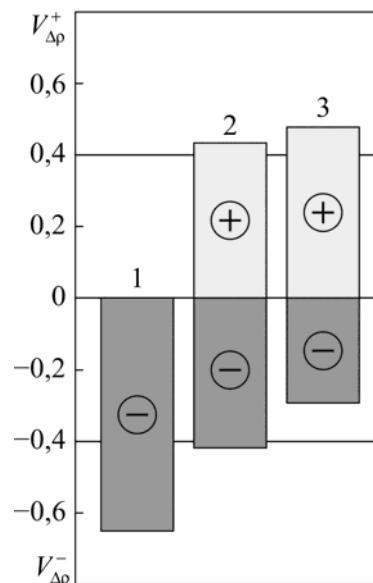


Рис. 5.10. Швидкість зміни седиментаційної стійкості:

1 – без удосконалення системи; 2 – з додатковою Х-подібною циркуляцією та автоматичним регулюванням седиментаційної стійкості; 3 – з додатковою Х-подібною циркуляцією з одночасною подачею повітря в нижню частину танка та автоматичним регулюванням седиментаційної стійкості

Таким чином, аналіз ефективності способів удосконалення системи зберігання та циркуляції БС на судах типу PSV, виконаний за оцінкою швидкістю зміни седиментаційної стійкості БС та за графоаналітичним методом оцінки залежності $\Delta\rho=f(t)$ свідчить про доцільність його використання на судах морського та внутрішнього водного транспорту

5.3. Аналіз енергетичної ефективності систем зберігання та циркуляції бурильної суспензії суден типу PSV

Загальний аналіз та визначення втрат напору при циркуляції БС складні (через складний співмножник W у виразі 4.44). При цьому оцінити рівень цих втрат можливо щодо зміни витрати БС, що перекачується вантажним насосом за різних умов експлуатації системи. З цією метою під час проведення досліджень на судні PSV дедвейтом 4630 тонн (п. 3.4 та 4.2) до суднової системи циркуляції БС додатково встановлювався витратомір (позиції 3 на рис. 4.12). Після визначення витрати БС відносна продуктивність вантажних насосів (позиції 4 на рис. 4.12) розраховувалася за виразом

$$\Delta Q = \frac{Q_d}{Q_{\max}} \cdot 100\%. \quad (5.5)$$

де ΔQ – відносна продуктивність насоса, %; Q_d і $Q_{\max}$ – дійсна та максимальна (паспортна) продуктивність вантажних насосів, м³/год, при цьому обидві продуктивності визначаються за однакового значення потужності, що споживається вантажним насосом.

Вираз (5.5) дозволяє визначити доцільність та ефективність використання додаткової Х-подібної циркуляції БС після завершення її транспортування на нафтовидобувну платформу. Аналогічну оцінку можна

отримати шляхом вимірювання часу перекачування БС із вантажних танків на бурову платформу за різних умов експлуатації системи [244]. Значення даних параметрів для експериментів, виконаних на судні PSV дедвейтом 4630 тонн, наведені у таблиці 5.6, а також відображено на діаграмах рис. 5.11.

Таблиця 5.6

Результати експерименту на судні на судні PSV дедвейтом 4630 тонн

Параметр	Спосіб транспортування	
	<i>I</i>	<i>II</i>
Відносна продуктивність вантажних насосів, ΔQ , %	38...55	92...96
Час перекачування суспензії бурильної з вантажних танків на бурову платформу, t , год	7,1	3,2

Примітка: *I* – транспортування без зміни конструкції; *II* – транспортування з додатковою Х-подібною циркуляцією

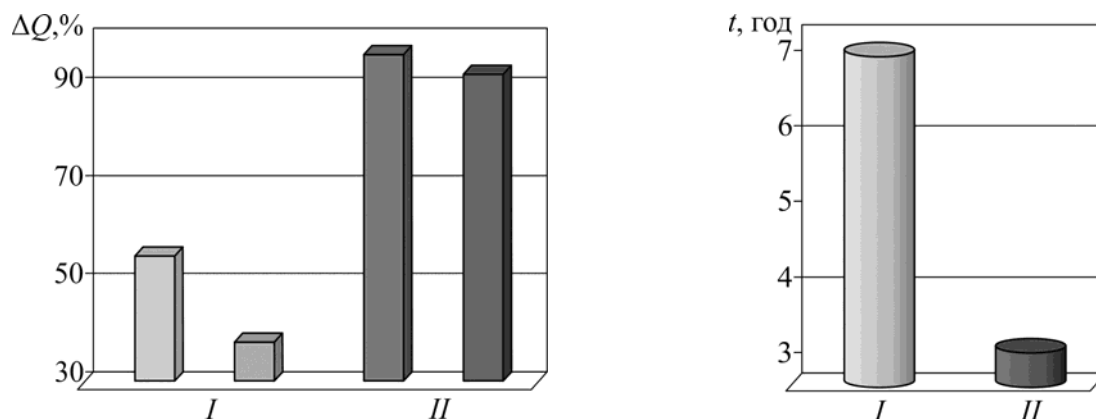


Рис. 5.11. Відносна продуктивність вантажних насосів, ΔQ , %, та час перекачування бурильної суспензії з вантажних танків на бурову платформу, t , години, (судно типу PSV дедвейтом 4630 тонн):

I – транспортування без зміни конструкції; *II* – транспортування з додатковою Х-подібною циркуляцією

Найменше значення ΔQ у разі транспортування бурильної суспензії без зміни конструкції системи пояснюється меншою (порівняно з транспортуванням бурильної суспензії з додатковою Х-подібною

циркуляцією) величиною дійсної продуктивності вантажних насосів. Останнє пов'язано зі збільшенням гідравлічних опорів, що виникають у системі через розшарування суспензії бурильної і утворення осаду з легованих компонентів. Цим пояснюється підвищений час перекачування бурильної суспензії у разі її транспортування без зміни конструкції системи [245]. За такою ж схемою виконувалися виміри та розрахунки під час експериментів, виконаних на судні PSV дедвейтом 4545 тонн. Їх результати наведені у таблиці 5.7 та на діаграмах рис. 5.12.

Таблиця 5.7

Результати експерименту на судні PSV дедвейтом 4545 тонн

Параметр	Спосіб транспортування	
	<i>I</i>	<i>II</i>
Відносна продуктивність вантажних насосів, ΔQ , %	33...48	88...95
Час перекачування суспензії бурильної з вантажних танків на бурову платформу, t , год	7,3	3,6

Примітка: *I* – транспортування без зміни конструкції;

II – транспортування з додатковою Х-подібною циркуляцією

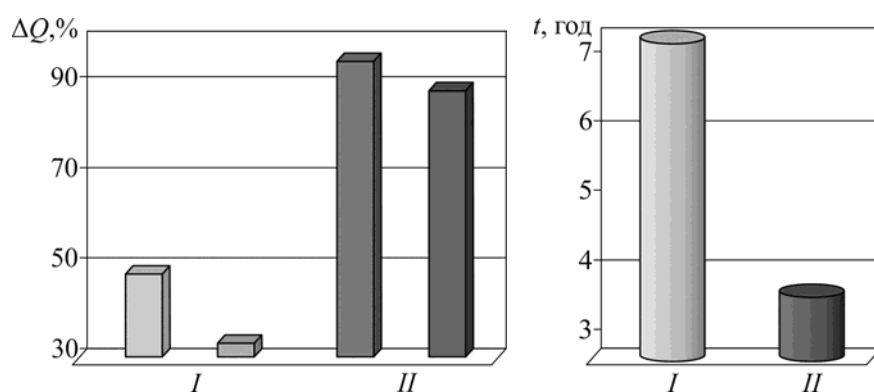


Рис. 5.12. Відносна продуктивність вантажних насосів, ΔQ , %, та час перекачування суспензії бурильної з вантажних танків на бурову платформу, t , години, (судно типу PSV дедвейтом 4630 тонн):

I – транспортування без зміни конструкції; *II* – транспортування з додатковою Х-подібною циркуляцією

Аналогічний аналіз ефективності вдосконаленої системи перевезення БС виконувався на суднах PSV, на яких транспортування БС виконувалося з використанням примусової циркуляції та одночасною подачею повітря в нижню частину вантажного танка (судна PSV дедвейтом 4410 та 5850 тонн).

Результати експериментів наведені в таблицях 5.8, 5.9 (у яких *I* – транспортування без зміни конструкції системи; *II* – транспортування з додатковою Х-подібною циркуляцією; *III* – транспортування з додатковою Х-подібною циркуляцією та одночасною подачею повітря в нижню частину вантажного танка), а також на рис. 5.13, 5.14.

Таблиця 5.8

Результати експерименту на судні типу PSV дедвейтом 4410 тонн

Параметр	Спосіб транспортування		
	<i>I</i>	<i>II</i>	<i>III</i>
Відносна продуктивність вантажних насосів, ΔQ , %	35...52	88...93	95...97
Час перекачування суспензії бурильної з вантажних танків на бурову платформу, t , год	6,9	3,7	3,1

Таблиця 5.9

Результати експерименту на судні типу PSV дедвейтом 5850 тонн

Параметр	Спосіб транспортування		
	<i>I</i>	<i>II</i>	<i>III</i>
Відносна продуктивність вантажних насосів, ΔQ , %	42...48	85...91	91...95
Час перекачування суспензії бурильної з вантажних танків на бурову платформу, t , год	7,3	3,3	3,1

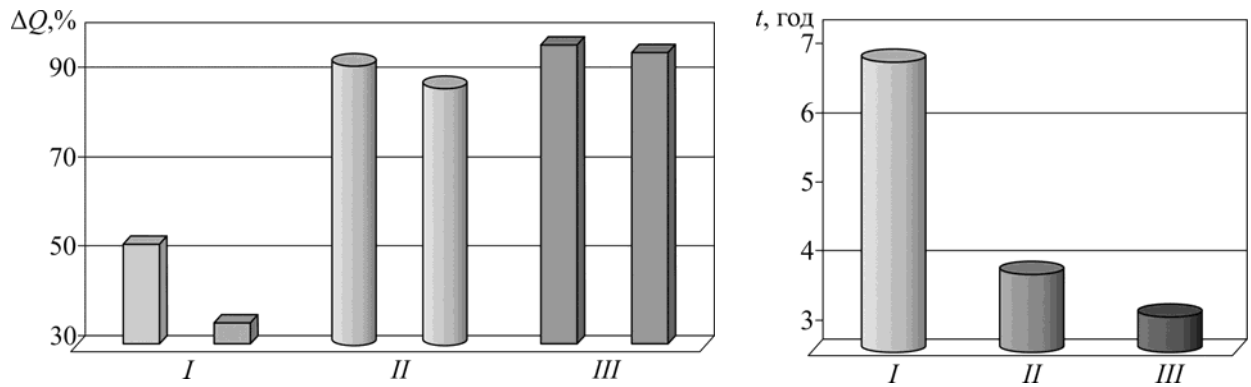


Рис. 5.13. Відносна продуктивність вантажних насосів, $\Delta Q, \%$, та час перекачування бурильної суспензії з вантажних танків на бурову платформу, $t, \text{ год}$ (судно PSV дедвейтом 4410 тонн):

I – транспортування без зміни конструкції системи; *II* – з додатковою Х-подібною циркуляцією; *III* – з додатковою Х-подібною циркуляцією та одночасною подачею повітря в нижню частину вантажного танка

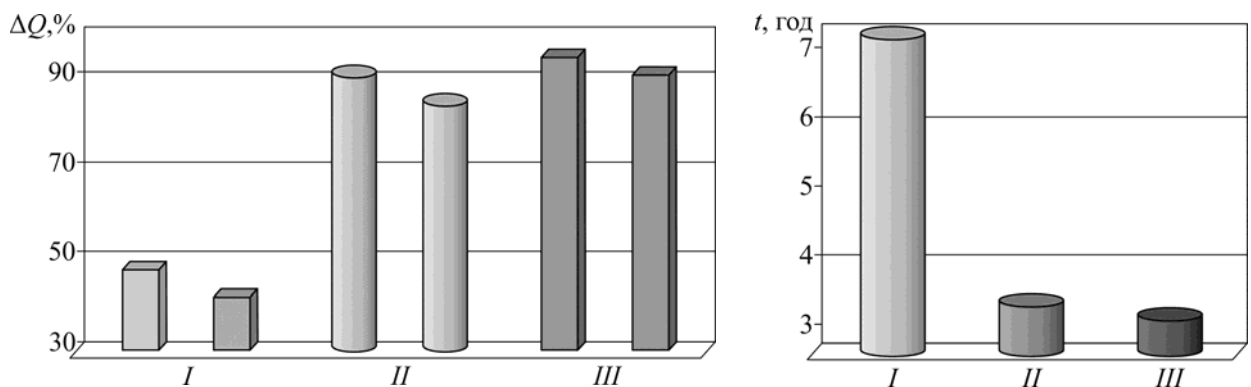


Рис. 5.14. Відносна продуктивність вантажних насосів, $\Delta Q, \%$, та час перекачування бурильної суспензії з вантажних танків на бурову платформу, $t, \text{ год}$ (судно PSV дедвейтом 5850 тонн):

I – транспортування без зміни конструкції системи; *II* – з додатковою Х-подібною циркуляцією; *III* – з додатковою Х-подібною циркуляцією та одночасною подачею повітря в нижню частину вантажного танка

Наведені у таблицях 5.6-5.9 та на рис. 5.11-5.14 результати свідчать про зниження енергетичних втрат на технологічний процес викачування БС із вантажних танків судна PSV на НБП [246, 247].

5.4. Висновки за розділом 5

Дослідження, результати яких наведені у розділі 5, підтверджують наступне.

1. Удосконалення системи зберігання та циркуляції бурильної суспензії на суднах типу PSV полягає у створенні її додаткової примусової циркуляції з одночасною подачею повітря та автоматичним регулюванням седиментаційної стійкості бурильної суспензії.

2. Додаткова примусова циркуляція бурильної суспензії, а також використання комплексного впливу на бурильну суспензію (шляхом одночасної примусової циркуляції та подачі повітря в нижню частину вантажного танка) сприяють зниженню стратифікації густини бурильної суспензії за глибиною вантажного танка, що призводить до стабілізації значення седиментаційної стійкості. При цьому удосконалена система транспортування бурильної суспензії містить у своєму складі:

- обладнання для циркуляції (яке активує ламінарний рух бурильної суспензії);
- обладнання для подачі повітря (при якому можливий локальний перехід ламінарного руху до турбулентного);
- засоби автоматичного регулювання седиментаційної стійкості бурильної суспензії під час її транспортування у вантажних танках суден типу PSV.

3. Для підтримки експлуатаційних характеристик бурильної суспензії та забезпечення функціонування системи транспортування бурильної суспензії необхідно автоматично підтримувати значення седиментаційної стійкості бурильної суспензії у діапазоні 2...7 %. При цьому при досягненні седиментаційної стійкості величини 7% забезпечується включення циркуляційних насосів та створення додаткової Х-подібної циркуляції бурильної суспензії між танками, що знаходяться поруч. Це підвищує

однорідний стан бурильної суспензії і сприяє зниженню її седиментаційної стійкості. Процес додаткової циркуляції бурильної суспензії раціонально забезпечувати до моменту, коли значення седиментаційної стійкості досягне величини 2 %.

4. Експериментально на судах типу PSV дедвейтом 4410 та 5850 тонн підтверджено, що автоматичне регулювання седиментаційної стійкості бурильної суспензії в діапазоні 2...7 % сприяє:

- підвищенню відносної продуктивності вантажних насосів від значень, як приклад, з 35...52 % (у разі звичайного транспортування бурильної суспензії) до 88...93 % (під час додаткової Х-подібної циркуляції бурильної суспензії) та до 95...97 % (під час транспортування з додатковою Х-подібною циркуляцією та одночасною подачею повітря в нижню частину вантажного танка);

- зниженню часу перекачування бурильної суспензії з вантажних танків на нафтовидобувну платформу, як приклад, з 6,9 год (у разі звичайного транспортування бурильної суспензії) до 3,7 год (під час додаткової Х-подібної циркуляції бурильної суспензії) та до 3,1 год (під час транспортування з додатковою Х-подібною циркуляцією та одночасною подачею повітря в нижню частину вантажного танка);

- підтримці технічного стану обладнання, трубопроводів та елементів системи транспортування та перекачування бурильної суспензії.

5. Як додатковий критерій оцінювання якості транспортування БС та ефективності виконаного удосконалення системи збереження та циркуляції БС на судах типу PSV доцільно використовувати швидкість зміни седиментаційної стійкості. Аналіз процесу транспортування бурильної суспензії суднами типу PSV свідчить, що найбільш ефективним способом удосконалення системи зберігання та циркуляції БС на судах типу PSV є такий, при якому відхилення швидкості зміни седиментаційної стійкості в позитивному напрямку перевищує подібне відхилення в негативному напрямку.

6. Удосконалення системи зберігання та циркуляції бурильної суспензії під час її транспортування на судах типу PSV забезпечує:

- збільшення інтенсивності ламінарного потоку бурильної суспензії;
- зменшення рівню коагуляції важких компонентів, якими легована бурильна суспензія;
- перебіг процесу додаткової примусової циркуляції БС з найбільшою енергетичною ефективністю;
- зниження енергетичних втрат на процес зберігання, транспортування та видачі бурильної суспензії на нафтовидобувну платформу.

Дослідження, результати яких наведені в розділі 5, підтверджують доцільність використання додаткової Х-подібної циркуляції бурильної суспензії для зниження енергетичних втрат під час її транспортування суднами типу PSV.

ВИСНОВКИ

Дисертаційне дослідження спрямоване на розв'язання науково-прикладного завдання – удосконалення системи зберігання та циркуляції бурильної суспензії під час її транспортування на судах типу PSV шляхом забезпечення додаткової Х-подібної циркуляції та підтримки реологічних характеристик бурильної суспензії.

Судна типу PSV використовуються багатьма країнами для постачання морських нафтовидобувних платформ різними речовинами, зокрема бурильною суспензією, під час транспортування якої виникає латентне осадження важких компонентів, якими вона легована, утворення осаду з цих компонентів та розшарування бурильної суспензії. Одним зі способів запобігання розшарування бурильної суспензії за глибиною вантажного танку є створення додаткової циркуляції бурильної суспензії (яку над відміну від існуючих способів доцільно забезпечувати в Х-подібному варіанті – з'єднуючи між собою верхні та нижні частини вантажних танків, що знаходяться поруч) та управління реологічними характеристиками бурильної суспензії (густиною та седиментаційною стійкістю).

Рекомендації, які існують, з технічної експлуатації та обслуговування судових систем зберігання та циркуляції бурильної суспензії не визначають діапазонів підтримання цих показників, поодинокі наукові дослідження в цьому напрямку спрямовані на вивчення властивостей бурильних суспензій під час їхнього використання в континентальних районах та не враховують особливостей експлуатації суден морського та внутрішнього водного транспорту.

Головним науковим результатом дисертаційної роботи є розробка способу підтримання густини та седиментаційної стійкості бурильної суспензії під час її транспортування суднами типу PSV шляхом комплексної

дії на її структурні компоненти створенням умов її Х-подібної циркуляції та одночасним введенням в її об'єм стисненого повітря.

Основні наукові та практичні результати дисертаційного дослідження.

1. Транспортування бурильної суспензії суднами типу PSV неможливо без латентної зміни її реологічних характеристик – густини та седиментаційної стійкості та її розшарування. Для групи суден типу PSV водотоннажністю 4410, 4630, 5220, 5650 та 5860 тонн за час транспортування 24...48 год полегшування бурильної суспензії у верхній частині вантажного танку (що характеризується кількісним показником процесу зберігання та циркуляції бурильної суспензії – густиною) може досягати 22,45 %, обважнювання бурильної суспензії в нижній частині вантажного танку – до 30,76 %. Діапазон зміни седиментаційної стійкості бурильної суспензії (яка є якісним показником) за вказаними умовами транспортування може досягати 38,78 %.

Різні обсяги та геометричні розміри вантажних танків, в яких здійснювалось перевезення бурильної суспензії, різний дедвейт суден типу PSV, що забезпечували ці перевезення, різна тривалість перевезень та різні характеристики бурильних суспензій не дозволяють скласти регресійне або апроксимаційне рівняння за результатами експерименту та використовувати його як універсальне для всіх суден. При цьому для всіх експериментів доведена ідентичність отриманих результатів та збіг висновків з їхнього проведення.

2. Запобігання розшарування бурильної суспензії можливе за рахунок додаткової примусової Х-подібної циркуляції бурильної суспензії між вантажними танками, що знаходяться поруч один до одного.

Експериментальні дослідження, що були проведені на суднах типу PSV дедвейтом 4410, 4630, 5850, 6120 тонн під час транспортування бурильної суспензії з густиною 1174, 1295, 1240, 1323, 1162, 1172, 1232 кг/м³ протягом 24, 36, 48 годин виявили, що удосконалення системи зберігання та циркуляції бурильної суспензії забезпеченням додаткової Х-подібної циркуляції

бурильної суспензії порівняно з її транспортуванням в системі зберігання та циркуляції без удосконалення призводить до:

- зменшення стратифікації густини за глибиною вантажного танку (як приклад, з діапазону значень $982...1453 \text{ кг/м}^3$ до $1235...1253 \text{ кг/м}^3$ та з діапазону значень $1073...1387 \text{ кг/м}^3$ до $1162...1222 \text{ кг/м}^3$);

- підвищення седиментаційної стійкості (як приклад, з діапазону значень $0,8...32,42 \%$ до $0,2...1,44 \%$ та з діапазону значень $1,87...22,63 \text{ кг/м}^3$ до $1,32...4,93 \text{ кг/м}^3$).

Найбільші значення седиментаційної стійкості у випадку транспортування бурильної суспензії без удосконалення конструкції суднової системи зберігання та циркуляції за час транспортування 24 год досягає значення 38,78 %; у випадку вдосконалення системи за рахунок примусової Х-подібної циркуляції значення седиментаційної стійкості за цей проміжок часу не перевищує 5,52 %.

3. До більшої ефективності призводить удосконалення системи зберігання та циркуляції застосуванням комплексного методу, який полягає в одночасному забезпеченні примусової Х-подібної циркуляції бурильної суспензії та подачею повітря в нижню частину вантажного танка. Впровадження цього методу на суднах типу PSV дедвейтом 5850, 6120 тонн під час транспортування бурильної суспензії з густиною 1162, 1172, 1232 кг/м^3 протягом 36 та 48 годин виявили, що при цьому забезпечується:

- зменшення стратифікації густини за глибиною вантажного танку (як приклад, з діапазону значень $912...1278 \text{ кг/м}^3$ до $1156...1181 \text{ кг/м}^3$ та з діапазону значень $1105...1463 \text{ кг/м}^3$ до $1226...1263 \text{ кг/м}^3$);

- підвищення седиментаційної стійкості (як приклад, з діапазону значень $0,34...28,64 \%$ до $0,34...2,12 \%$ та з діапазону значень $0,24...24,47 \%$ до $0,24...2,93 \%$).

Найбільші значення седиментаційної стійкості у випадку транспортування бурильної суспензії без удосконалення конструкції суднової системи зберігання та циркуляції за час транспортування 48 год досягає

значення 28,64 %; у випадку вдосконалення системи за рахунок одночасної примусової Х-подібної циркуляції та подачі повітря в нижню частину вантажного танка значення седиментаційної стійкості за цей проміжок часу не перевищує 2,12 %.

4. Найбільш раціональною ділянкою суднової системи збереження та транспортування бурильної суспензії, що відповідає умовам встановлення мобільного обладнання, яке забезпечує додаткову примусову циркуляцію бурильної суспензії, є нижній рівень вантажного танка. Це забезпечує негативне значення висоти підйому бурильної суспензії під час всмоктування, що суттєво зменшує значення статичної складової напору та відповідне зниження загальних гідравлічних втрат на технологічний процес перекачування бурильної суспензії. Додаткові магістралі, що з'єднують насоси циркуляції та вантажні танки, можуть не мати арматури, що встановлюється перед всмоктуванням насосів, при цьому немає необхідності в установці подібної арматури на нагнітанні насосів (у зв'язку з тим, що циркуляція бурильної суспензії забезпечується безпосередньо на поверхню вантажного танка).

Викачування бурильної суспензії на нафтовидобувну платформу доцільно виконувати в завершенні технологічного процесу розвантаження судна типу PSV (в умовах, коли через зменшення дедвейту судна пропорційно зменшується осадка судна і підвищується висота надводного борту), що сприяє зменшенню значення висоти підйому бурильної суспензії під час нагнітання.

5. Для підтримки експлуатаційних характеристик бурильної суспензії та забезпечення функціонування системи транспортування бурильної суспензії удосконалена система зберігання та циркуляції бурильної суспензії має забезпечувати автоматичне регулювання седиментаційної стійкості бурильної суспензії у діапазоні 2...7 %.

Експериментально на судах типу PSV дедвейтом 4410 та 5850 тонн підтверджено, що автоматичне регулювання седиментаційної стійкості бурильної суспензії в діапазоні 2...7 % сприяє:

- підвищенню відносної продуктивності вантажних насосів від значень, як приклад, з 35...52 % (у разі звичайного транспортування бурильної суспензії) до 88...93 % (під час додаткової Х-подібної циркуляції бурильної суспензії) та до 95...97 % (під час транспортування з додатковою Х-подібною циркуляцією та одночасною подачею повітря в нижню частину вантажного танка);

- зниженню часу перекачування бурильної суспензії з вантажних танків на нафтовидобувну платформу, як приклад, з 6,9 год (у разі звичайного транспортування бурильної суспензії) до 3,7 год (під час додаткової Х-подібної циркуляції бурильної суспензії) та до 3,1 год (під час транспортування з додатковою Х-подібною циркуляцією та одночасною подачею повітря в нижню частину вантажного танка);

- підтримці технічного стану обладнання, трубопроводів та елементів системи транспортування та перекачування бурильної суспензії.

6. Удосконалення системи зберігання та циркуляції бурильної суспензії під час її транспортування на судах типу PSV забезпечує:

- збільшення інтенсивності ламінарного потоку бурильної суспензії;
- зменшення рівню коагуляції важких компонентів, якими легована бурильна суспензія;
- перебіг процесу додаткової примусової циркуляції БС з найбільшою енергетичною ефективністю;
- зниження енергетичних втрат на процес зберігання, транспортування та видачі бурильної суспензії на нафтовидобувну платформу.

7. Наведені в дисертації теоретично обґрунтовані та експериментально підтверджені наукові результати мають суттєво практичне значення:

- удосконалена система зберігання та циркуляції БС (що забезпечує додаткову примусову Х-подібну циркуляції БС) на спеціалізованому

морському судні типу PSV дедвейтом 4630 тонн забезпечила підтримання реологічних характеристик БС під час її 30-ти годинного транспортування та більш ніж 2 - кратне (з 7,1 до 3,2 годин) зниження часу перекачування БС на нафтовидобувну платформу;

- удосконалена система зберігання та циркуляції БС (що забезпечує додаткову примусову Х-подібну циркуляції БС) на спеціалізованому морському судні типу PSV дедвейтом 4545 тонн забезпечила підтримання реологічних характеристик БС під час її 56-ти годинного транспортування, 2,0...2,7 кратне підвищення відносної продуктивності вантажних насосів (зі значень 33...48 до 88...98 %) та більш ніж 2 - кратне (з 7,3 до 3,6 годин) зниження часу перекачування БС на нафтовидобувну платформу;

- удосконалена система зберігання та циркуляції БС (що забезпечує комплексний вплив на БС шляхом Х-подібної циркуляції з одночасною подачею повітря в нижню частину вантажного танку) на спеціалізованому морському судні типу PSV дедвейтом 4410 тонн сприяла 1,9...2,7 кратному підвищенню відносної продуктивності вантажних насосів (зі значень 35...52 до 95...97 %) та 2,2 - кратному (з 6,9 до 3,1 годин) зниженню часу перекачування БС на нафтовидобувну платформу;

- удосконалена система зберігання та циркуляції БС (що забезпечує комплексний вплив на БС шляхом Х-подібної циркуляції з одночасною подачею повітря в нижню частину вантажного танку та автоматичним регулюванням реологічних характеристик БС) на спеціалізованому морському судні типу PSV дедвейтом 5850 тонн сприяла 2,0...2,2 кратному підвищенню відносної продуктивності вантажних насосів (зі значень 42...48 до 91...95 %) та 2,4-х кратному (з 7,3 до 3,1 годин) зниженню часу перекачування БС на нафтовидобувну платформу;

- запропонований спосіб оцінювання якості перебігу процесу транспортування бурильної суспензії (на підставі швидкості зміни її седиментаційної стійкості) на спеціалізованому морському судні типу PSV

дедвейтом 4630 тонн сприяло скороченню часу налагодження системи автоматичного регулювання реологічних характеристик БС з боку оператора;

- удосконалена система (що забезпечує подачу повітря в нижню частину вантажного танку) на вантажному судні дедвейтом 37250 тонн сприяла запобіганню розшарування важкого палива у витратних та відстійних цистернах.

Удосконалена система зберігання та циркуляції бурильної суспензії на судах типу PSV є прикладом впровадження сучасних технології під час експлуатації суден морського та внутрішнього водного транспорту.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Голіков В.А. Розвиток сучасної теорії і практики технічної експлуатації морського і річкового флоту: концепції, методи, технології / В.А. Голіков, О.А. Онищенко // Суднові енергетичні установки : наук.-техн. зб. – 2017. – Вип. 37. – Одеса : НУ «ОМА». – С. 13-27.
2. Karianskyi S.A. Features of transportation of high-density technical liquids by marine specialized vessels / S.A. Karianskyi, D.M. Maryanov // Materials of the International Conference “Scientific research of the SCO countries: synergy and integration January 25, 2020. Part 2. Beijing, PRC. – P. 150-153. DOI. 10.34660/INF. 2020.24.53688.
3. Aditya N.D. Development of small vessel advisory and forecast services system for safe navigation and operations at sea / N.D. Aditya, K.G. Sandhya, R. Harikumar, T.M. Balakrishnan // Journal of Operational Oceanography. –2022. – Vol. 15(1). – P. 52-67. DOI: 10.1080/1755876X.2020.1846267.
4. Karina von Schuckmann, [etc]. Copernicus Marine Service Ocean State Report / Karina von Schuckmann // Journal of Operational Oceanography. – 2021. – Iss. 5. – Vol. 14. – P. 1-185, DOI: 10.1080/175587X.2021.1946240.
5. Fagerholt K. Optimal policies for maintaining a supply service in the Norwegian Sea / K. Fagerholt, H. Lindstad // Omega. – 2000. – № 28. – P. 269-275.
6. Соловей А.С. Выбор закона регулирования в задаче позиционирования специализированных грузовых морских судов / А.С. Соловей, А.П. Бень, С.А. Рожков // Вестник Херсонского нац. тех. ун-та. – 2017. – № 3(62). – С. 221-227.
7. Akimova O. Development of the methodology of the choice of the route of work of platform supply vessels in the shelf of the seas / O. Akimova, A. Kravchenko // Technology Audit and Production Reserves. – 2018. – № 5(2(43)). – P. 30-35. <https://doi.org/10.15587/2312-8372.2018.146322>.

8. Halvorsen-Weare E.E. Fleet size and mix and periodic routing of offshore supply vessels / E.E. Halvorsen-Weare, K. Fagerholt, L.M. Nonas, B.E. Asbjørnslett // Working paper submitted. Norwegian University of Science and Technology. – 2010.

9. Barretto M. R. P. A Decision Support System for Allocating General Cargo in Platform Supply Vessels / M. R. P. Barretto, R.E. Cruz, A.B. Mendes, M.P. Seixas, C.B. da Cunha, M.A. Brinati // OTC Brasil. Rio de Janeiro: Offshore Technology Conference. – 2013. – P. 24433. doi: <http://doi.org/10.4043/24433-ms>.

10. Шибаев О.Х. Класифікація технічних засобів, що забезпечують процес видобутку і транспортування вуглеводнів в шельфах Чорного та Азовського морів / О.Х. Шибаев, О.В. Акімова, О.А. Кравченко // Вісник Південноукраїнського національного ун-ту ім. Володимира Даля. – 2017. – № 4(234). – С. 119–125.

11. Кар'янський С.А. Передумови удосконалення системи менеджменту якості експлуатації суден / С.А. Кар'янський // XI Міжнародна наук.-техн. конференція «Суднова електроінженерія, електроніка і автоматика». Одеса : НУ «ОМА», 23.11.2021 – 24.11.2021. – С. 199-203. DOI:10.31653/2706-7874.SEEEA-2021.11.1-238

12. Cement slurries of oil wells under high temperature and pressure: the effects of the use of ceramic waste and silica flour / P.P. Souza, R.A. Soares, M.A. Anjos, J.O. Freitas, A.E. Martinelli, D.F. Melo // Brazilian journal of petroleum and gas. –2012. – Vol. 6. – № 3. – P. 105-113.

13. Maryanov D.M. Maintaining the efficiency of drilling fluids when they are transported by platform supply vessels class offshore vessels / D.M. Maryanov // Austrian Journal of Technical and Natural Sciences. Scientific journal. – 2021. – № 7–8 (July – August). – P. 22-28. <https://doi.org/10.29013/AJT-21-7.8-22-28>.

14. Eliseev B.S. Mathematical modeling of rock crushing and multiphase flow of drilling fluid in well drilling / B.S. Eliseev, A.A. Pogarskaya, E.E. Toropov // Journal of Mining Institute. – 2019. – Vol. 235. – P. 16-23. DOI: 10.31897/PMI.2019.1.16.

15. Gribkovskaia I. A tabu search heuristic for a routing problem arising in servicing of offshore oil and gas platforms / I. Gribkovskaia, G. Laporte, A. Shlopak // *Journal of the Operational Research Society*. – 2008. – № 59. – P. 1449-1459.

16. Богом'я В.І. Розроблення науково-технічних пропозицій щодо використання систем динамічного позиціонування на пасажирських судах / В.І. Богом'я, С.І. Бондаренко, Н.В. Кривенко // *Водний транспорт*. – 2012. – № 3(15). – С. 12-17.

17. Lipin A. A., Kharlamov Y. P., Timonin V. V. Circulation system of s pneumatic drill with central drilling MUD removal / *Journal of Mining Science*. – 2013. – Vol. 49. – Iss. 2. – P. 248-253. DOI: 10.1134/S1062739149020068.

18. Erikstad S.O. System Based Design of Offshore Support Vessels / S.O. Erikstad, K. Levander // *Proceedings of the 11th International Marine Design Conference*. Glasgow: Dept. of Naval Architecture and Marine Engineering, University of Strathclyde. – 2012. – P. 1-17.

19. Kelessidis V.C. Optimal determination of rheological parameters for Herschel – Bulkley drilling fluids and impact on pressure drop, velocity profiles and penetration rates during drilling / V.C. Kelessidis, R. Maglione, C. Tsamantaki, Y. Aspirtakis // *Journal of Petroleum Science and Engineering*. – 2006. – Vol. 53. – Iss. 3-4. – P. 203-224. DOI: 10.1016/j.petrol.2006.06.004.

20. Dvoynikov M.V. Research on technical and technological parameters of inclined drilling / M.V. Dvoynikov // *Journal of Mining Institute*. – 2017. – Vol. 223. – P. 86-92. DOI: 10.18454/PMI.2017.1.86

21. Litvinenko V.S. Justification of the technological parameters choice for well drilling by rotary steerable systems / V.S. Litvinenko, M.V. Dvoynikov // *Journal of Mining Institute*. – 2019. – Vol. 235. – P. 24-29. DOI: 10.31897/PMI.2019.1.24.

22. Демешко Г.Ф. Особенности проектирования и эксплуатации судов снабжения и обеспечения шельфовых работ по разведке и добыче углеводородов / Г.Ф. Демешко, Р.А. Децик // *Труды Крыловского*

государственного научного центра. – 2021. – № 1(395). – С. 85-98. DOI: 10.24937/2542-2324-2021-1-395-85-98

23. Fedorov G.B. Development of Vibroacoustic Module for Fine Filtration of Drilling Muds / G.B. Fedorov, O.L. Dudchenko, D.S. Kurenkov // Journal of Mining Institute. – 2018. – Vol. 234. – P. 647-651. DOI: 10.31897/PMI.2018.6.647.

24. Sadlier A.G. Data Aggregation and Drilling Automation: Connecting the Interoperability Bridge between Acquisition, Monitoring, Evaluation and Control / A.G. Sadlier, M.L. Laing, J.A. Shields // IADC/SPE Drilling Conference and Exhibition. – 2012. – P. 151412. doi: <https://doi.org/10.2118/151412-ms>. - в5

25. Elmgerbi A. Application of Computer Programming to Estimate Volumetric Change of an Active Drilling Fluid System Cause by Elastic Deformation of an Open Borehole Section Wall / A. Elmgerbi, G. Thonhauser, M. Prohaska, A. Nascimento, A. Roohi // Global Journal of Computer Science and Technology. – 2016. – № 16(3). – P. 15-30. Available at: <http://www.researchgate.net/publication/310604690>.

26. Бурков А.Ф. Повышение эффективности управления комбинированными энергетическими установками судов / А.Ф. Бурков, В.В. Миханошин, Нгуен Ван Ха // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. – 2020. – Т. 12. – № 2. – С. 381-389. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-2-381-389.

27. Sadlier A.G. Interoperability: An Enabler for Drilling Automation and a Driver for Innovation / A.G. Sadlier, M.L. Laing // SPE/IADC Drilling Conference and Exhibition. – 2011. – P. 140114. doi: <https://doi.org/10.2118/140114-ms>.

28. Иванов А.А. Исследование устойчивости навигационной системы морского судна / А.А. Иванов, Н.В. Ивановский // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2013. – № 1/9(61). – С. 65-68.

29. Рожков С.О. Моделювання системи динамічного позиціонування судна-постачальника типу PSV / С.О. Рожков // Вісник Херсонського нац. техн. ун-ту. – 2015. – № 4(55). – С. 159-166.

30. Габрук Р.А. Формализация комплексной методики гарантированной безопасности динамического позиционирования / Р.А. Габрук // Водный транспорт. – 2013. – № 2(17). – С. 202-207.

31. Добрынин А.Я. Особенности оценки мощности при проектировании судов обеспечения буровых установок / А.Я. Добрынин, Б.А. Царев // Морской вестник. – 2013. – Спец. вып. – № 1(10). – С. –101-106.

32. Sutar H. Progress of Red Mud Utilization: An Overview / H. Sutar // American Chemical Science Journal. – 2014. – Vol. 4. – Iss. 3. – P. 255-279. doi: 10.9734/acsj/2014/7258.

33. Огай С.А. Модели определения характеристик при создании многоцелевых судов для арктических и замерзающих морей / С.А. Огай. – Владивосток : Дальнаука. – 2018. – 314 с.

34. Su Z., Zhu L., Yuan H., Guo J., Yu M. System availability bayes confidence limits for drilling mud pump / Jixie gongcheng xuebao. – 2014. – Vol. 50. – Iss. 14. – P. 56-61. DOI: 10.3901/JME.2014.14.056.

35. Speight J.G. Handbook of offshore oil and gas operations / Elsevier, 2015. – 363 p.

36. Барахта А.В. Структура и принципы работы системы динамического позиционирования / А.В. Барахта, Ю.И. Юдин / Вестник МГТУ. Труды Мурманского гос. тех. ун-та. – 2009. – Т. 12. – № 2. – С. 255-258.

37. Resolution MSC.267(85) – Adoption of the International Code on Intact Stability, 2008 (2008 IS Code) – (Adopted on 4 December2008) https://www.imorules.com/MSCRES_267.85.html

38. Resolution MSC.235(82) - Adoption of the Guidelines for the Design and Construction of Offshore Supply Vessels, 2006 - (adopted on 1 December2006) https://www.imorules.com/MSCRES_235.82.html

39. IMO Resolution A.863(20) – Code of Safe Practice for the Carriage of Cargoes and Persons by Offshore Supply Vessels (OSV Code) – (Adopted on 27 November1997) https://www.imorules.com/IMORES_A863.20.html

40. Kondratenko Y.P. Topalov A.M., Kozlov O.V. Simulation of the Initial Stability of the Floating Dock for the List and Trim Stabilization Tasks // Problems of the Regional Energetics. – 2019. – Vol. 1-2(41). – P. 12-24. DOI: 10.5281/zenodo.3239200.

41. Budashko V.V. Increasing the efficiency of hybrid propulsion complexes for multipurpose vessels by different criteria of the energy management strategies / V.V. Budashko // Wschodnioeuropejskie Czasopismo Naukowe (East European Scientific Journal). – 2019. – Vol. 10(50). – P. 53-62.

42. Budashko V.V. Thrusters physical model formalization with regard to situational and identification factors of motion modes / V.V. Budashko // International journal of energy and environment. – 2020. – Vol. 14. – P. 5-8.

43. Varbanets R. Determination of top dead centre location based on the marine diesel engine indicator diagram analysis / R. Varbanets, V. Zalozh, A. Shakhov, I. Savelieva, V. Pitera // Diagnostyka. – 2020. – № 21(1). – P. 51-60. <https://doi.org/10.29354/diag/116585>.

44. Varbanets R. Acoustic Method for Estimation of Marine Low-Speed Engine Turbocharger Parameters / R. Varbanets etc. Journal of Marine Science and Engineering. – 2021. – Vol. 9. – P. 321. <https://doi.org/10.3390/jmse9030321>

45. Vedyakova A.O. Multi-Purpose law for marine dynamic position system under the influence of sea waves / A.O. Vedyakova // Modern information technologies and IT-education. – 2020. – Vol. 16. – Iss. 1. – P. 72-80. DOI: 10.25559/SITITO.16.202001.72-80.

46. Кондратенко А.А. Сравнительный анализ существующих методов определения функционального и количественного состава флота судов обеспечения / А.А. Кондратенко, О.В. Таровик // Труды Крыловского государственного научного центра. – 2016. – № 94(378). – С. 201–214.

47. Кондратенко А.А. Планирование работы флота на континентальном шельфе / А.А. Кондратенко // Морские интеллектуальные технологии. – 2017. – № 1-1(35). – С. 29-38

48. Fagerholt K. A decision support methodology for strategic planning in maritime transportation / K. Fagerholt, M. Christiansen, L.M. Hvattum, T.A.V. Johnsen, T.J. Vabø // *Omega*. – 2010. – № 38. – P. 465-474.

49. Halvorsen-Weare E.E. Robust Supply Vessel Planning / E.E. Halvorsen-Weare, K. Fagerholt. In: Pahl J., Reiners T., Voß S. Network Optimization. INOC 2011. Lecture Notes in Computer Science. – 2011. – Vol. 6701. Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-21527-8_62.

50. Ткаченко Д.А. Гребные электрические установки судов снабжения плавучих буровых установок / Д.А. Ткаченко, В.В. Романовский // *Эксплуатация морского транспорта*. – 2012. – № 4(70). – С. 55-58.

51. Sagin S.V. Comparative assessment of marine diesel engine oils / S.V. Sagin, T.O. Stoliaryk // *Austrian Journal of Technical and Natural Sciences. Scientific journal*. – 2021. – № 7-8 (July – August). – P. 29-35. <https://doi.org/10.29013/AJT-21-7.8-29-35>.

52. Sagin S.V. Cavitation Treatment of High-Viscosity Marine Fuels for Medium-Speed Diesel Engines / S.V. Sagin, V.G. Solodovnikov // *Modern Applied Science*. – 2015. – Vol. 9. – № 5. – P. 269-278. DOI:10.5539/mas.v9n5p269.

53. Ткаченко І.В. Використання в суднових енергетичних установках технології гідродинамічної суперкавітації для розділення і очищення вод, що містять нафту / І.В. Ткаченко // *Вісник Одеського національного морського університету : Зб. Наук. праць*, 2020. – № 2(62). – С. 130-141. DOI 10.47049/2226-1893-2020-1-130-141.

54. Марьянов Д.Н. Оптимизация работы MUD systems морских специализированных судов / Д.Н. Марьянов // *Морський та річковий флот : експлуатація і ремонт : Матеріали Міжнародної науково-технічної конференції*. – Одеса : Національний університет «Одеська морська академія», 2020. – С. 117-120.

55. Богуславец М. М. Забруднення довкілля: чинники і показники екологічної безпеки нафтопереробного об'єкта / М. М. Богуславец,

Л. І. Челядин, Д. Р. Крика // Екологічна безпека та збалансоване ресурсокористування. – 2020. № 19(2). – С. 43-49. [https://doi.org/10.31471/2415-3184-2019-2\(20\)-43-49](https://doi.org/10.31471/2415-3184-2019-2(20)-43-49).

56. Латухов С.В. Проблемы экологической безопасности судоходства : [монография] / С.В. Латухов. – СПб. : Изд-во Гос. ун-та мор. и реч. флота им. адм. С. О. Макарова, 2015. – 160 с.

57. Литвиненко В.С. Обоснование выбора параметров режима бурения скважин роторными управляемыми системами / В.С. Литвиненко, М.В. Двойников // Записки Горного института. – 2019. – Т. 235. – С. 24-29. DOI: 10.31897/PMI.2019.1.24.

58. Табатабаи Моради С.Ш. Разработка составов буферных жидкостей и тампонажных растворов для крепления скважин в условиях высоких температур / С.Ш. Табатабаи Моради, Н.И. Николаев, Т.Н. Николаева // Записки Горного института. – 2020. – Т. 242. – С. 174-178. DOI: 10.31897/PMI.2020.2.174.

59. Grain size effect of austenite on the kinetics of pearlite transformation in low- and medium-carbon low-alloy steels / A.E. Gvozdev, I.V. Minaev, N.N. Sergeev, A.G. Kolmakov, D.A. Provotorov, I.V. Tikhonova // Inorganic Materials: Applied Research. – 2015. – Vol. 6. – № 1. – P. 41-44.

60. Шуляр І.О. Дослідження технології параметрів виготовлення армованих зубків шарошок бурових доліт / І.О. Шуляр, В.В. Кустов, Л.О. Борушак, А.Б. Вірстюк // Науковий вісник Івано-Франківського нац. тех. ун-ту нафти і газу. – 2021. – № 2(51). – 23-31. DOI: 10.31471/1993-9965-2021-2(51)-23-31

61. Sagin S.V. Improving the performance parameters of systems fluids / S.V. Sagin // Austrian Journal of Technical and Natural Sciences, Vienna-2018. – № 7-8 (July-August). – P. 55-59. doi.org/10.29013/AJT-18-7.8-55-59.

62. Cherniak L. Development of a mineral binding material with elevated content of red mud / L. Cherniak, P. Varshavets, N. Dorogan // Technology audit

and production reserves. – 2017. – Vol. 3. – Iss. 3(35). – P. 22-28. doi: 10.15587/2312-8372.2017.105609.

63. Effects of red mud on rheological, crystalline, and mechanical properties of red mud/PBAT composites / L. Liu, Y. Zhang, F. Lv, B. Yang, X. Meng // Polymer Composites. – 2015. – Vol. 37. – Iss. 7. – P. 2001-2007. doi: 10.1002/pc.23378.

64. He J.F. Study of drilling muds on the anti-erosion property of a fluidic amplifier in directional drilling / J.F. He, P.Y. Zhang, Q.L. Yin, K. Yin, H.P. Liu // Frattura ed integrità strutturale. – 2015. – Vol. 9. – Iss. 34. – P. 564-573. DOI: 10.3221/IGF-ESIS.34.62.

65. Javadian S. Demulsification of water in oil emulsion by surface modified SiO₂ nanoparticle / S. Javadian, S.M. Sadrpour // Journal of petroleum science and engineering. – 2020. – Vol. 184. – P. 106547. DOI: 10.1016/j.petrol.2019.106547.

66. Kozlov V.K. Visual Determination of Transformer Oil Quality Parameters / D.M. Valiullina, O.E. Kurakina // Problems of the Regional Energetics. – 2021. – Vol. 2(50). – P. 25-34. doi.org/10.52254/1857-0070.2021.2-50.03

67. Ulyasheva N.M. Development of the drilling mud composition for directional wellbore drilling considering rheological parameters of the fluid / N.M. Ulyasheva, E.L. Leusheva, R.N. Galishin // Journal of Mining Institute. – 2020. – Vol. 244. – P. 454-461. DOI: 10.31897/PMI.2020.4.8.

68. Sagin S. V. Estimation of Operational Properties of Lubricant Coolant Liquids by Optical Methods / S. V. Sagin, V. G. Solodovnikov // International Journal of Applied Engineering Research. – 2017. – Vol. 12. – Num. 19. – P. 8380-8391.

69. Wang P. Physical and Chemical Properties of Sintering Red Mud and Bayer Red Mud and the Implications for Beneficial Utilization / P. Wang, D.-Y. Liu // Materials. – 2012. – Vol. 5. – Iss. 12. – P. 1800-1810. doi: 10.3390/ma5101800.

70. Wanderley Neto A.O. A novel oil-in-water microemulsion as a cementation flushing fluid for removing non-aqueous filter cake /

A.O. Wanderley Neto, D.V. Rodrigues, J.C. De Oliveira Freitas, V.L. Da Silva, L.S. Ribeiro, D.N. Nunes Da Silva // Journal of petroleum science and engineering. – 2020. – Vol. 184. – P. 106536. DOI: 10.1016/j.petrol.2019.106536.

71. Экологическая безопасность буровых растворов на основе лигносульфонатов / Д.Х. Акчурина, А.Х. Сафаров, И.В. Пашпекина, Л.А. Насырова, Г.Г. Ягафарова // Нефтегазовое дело. – 2014. – Т. 2. – № 1. – С. 179-182.

72. Цюман Є.С. Поліпшення показників екологічності підприємств застосування екологічної стратегії ресурсоефективного та чистого виробництва / Є.С. Цюман, В.І. Зюзюн // Збірник наукових праць Нац. ун-ту кораблебудування. – 2021. – № 2. – С. 53-60. [https://doi.org/10.15589/znp2021.2\(485\).8](https://doi.org/10.15589/znp2021.2(485).8).

73. Hamed S.B. Rheological properties of biopolymers drilling fluids / Hamed S.B., M. Belhadri // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2009. – Vol. 67. – Iss. 3-4. – P. 84-90. DOI: 10.1016/j.petrol.2009.04.001.

74. Sagin S.V. Motor Oil Viscosity Stratification in Friction Units of Marine Diesel Motors / S.V. Sagin, O.V. Semenov // American Journal of Applied Sciences. – 2016. – Vol. 13. – Iss. 2. – P. 200-208. DOI: 10.3844/ajassp.2016.200.208.

75. Li X. Study on wellbore temperature of riserless MUD recovery system by CFD approach and numerical calculation / X. Li, J. Zhang, X. Tang, G. Mao, P. Wang // Petroleum. – 2020. – Vol. 6. – Iss. 2. – P. 163-169. DOI: 10.1016/j.petlm.2019.06.006.

76. Liang Y. The process of high data rate MUD pulse signal in loggins while drilling system / Y. Liang, X. Ju, A. Li, C. Li, Z. Dai, L. Ma // Mathematical problems in engineering. – 2020. – P. 3207087. DOI: 10.1155/2020/3207087.

77. Ламбин А.И. Определение дисперсной фазы буровых растворов на полимерной основе / А.И. Ламбин, Е.В. Аверкина // Известия Сибирского отделения Секции наук о Земле Российской академии естественных наук.

Геология, разведка и разработка месторождений полезных ископаемых. – 2019. – Т. 42. – № 1. – С. 93-103. DOI: 10.21285/2541-9455-2019-42-1-93-103.

78. Медведева В.В. Реологические особенности смазочных материалов содержащих дисперсные наполнители на основе гидросиликатов магния / В.В. Медведева // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского политехн. ун-та. Естественные и инженерные науки. – 2017. – Т. 23. – № 4. – С. 141-148. DOI: 10.18721/JEST.230414.

79. Agafonov J.G. Infrasonics for intensification of mining practices. Scientific Reports on Resource Issues Innovations in Mineral Resource Value Chains: Geology, Mining, Processing, Economics, Safety, and Environmental Management / J.G. Agafonov, O.L. Dudchenko, G.B. Fedorov // Freiberg. – 2014. – Vol. 1. – P. 176-183.

80. Application of waste bulk moulded composite (BMC) as a filler for isotactic polypropylene composites / M Barczewski, D. Matykiewicz, J. Andrzejewski, K. Skrczewska // Journal of Advanced Research. – 2016. – Vol. 7. – Iss. 3. – P. 373-380. doi: 10.1016/j.jare.2016.01.001.

81. Lahoida A. Aspects of making of a composite material when using red mud / A. Lahoida, V. Boryn, G. Sementsov, V. Sheketa // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2020. – № 4/2(106). – P. 82-94. DOI: 10.15587/1729-4061.2020.209844.

82. Basovich V.S. The outlook for using aluminum drill pipes in drilling extensive horizontal wells / V.S. Basovich, I.N. Buyanovskiy, I.V. Petunkin // Drilling and Oil. – 2015. – № 6. – P. 80-85.

83. Mahmoudpour M. Investigation of the effect of engineered water/nanofluid hybrid injection on enhanced oil recovery mechanisms in carbonate reservoirs / M. Mahmoudpour, P. Pourafshary // Journal of petroleum science and engineering. – 2021. – Vol. 196. – P. 107662. DOI: 10.1016/j.petrol.2020.107662.

84. Making The Most Of Red Mud // Chemical & Engineering News Archive. – 2014. – Vol. 92. – Iss. 8. – P. 33-35. doi: 10.1021/cen-09208-scitech1.

85. Mahamathozhaev D.R. Application of mud composition at the opening of unstable clay deposits / D.R. Mahamathozhaev // *Austrian Journal of Technical and Natural Sciences. Scientific journal.* – 2016. – № 11–12 (November–December). – P. 75–77. DOI: <http://dx.doi.org/10.20534/AJT-16-11.12-75-77>.

86. Melnyk L. Aspects of making of a composite material when using red mud / L. Melnyk, V. Svidersky, L. Chernyak, N. Dorogan // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies.* – 2018. – № 2/6(92). – P. 23–28. DOI: [10.15587/1729-4061.2018.125702](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.125702).

87. Morenov V. Investigation of the fractional composition effect of the carbonate weighting agents on the rheology of the clayless drilling mud / V. Morenov, E. Leusheva, A. Martel // *International Journal of Engineering, IJE Transactions A: Basics.* – 2018. – Vol. 31. – № 7. – P. 1517–1525. DOI: [10.5829/ije.2018.31.07a.21](https://doi.org/10.5829/ije.2018.31.07a.21).

88. Melnyk L. Research of electrical properties of epoxy composite with carbon fillers / L. Melnyk // *Technology audit and production reserves.* – 2017. – Vol. 3. – Iss. 1(35). – P. 28–34. doi: [10.15587/2312-8372.2017.104807](https://doi.org/10.15587/2312-8372.2017.104807).

89. Shakirova A.I. Investigation of tribotechnical and corrosion behaviour of material for light-alloy drill pipes / A.I. Shakirova, R.A. Ismakov, A.Kh. Agliullin, N.K. Tsenev // *Arctic Environmental Research.* – 2018. – № 18(1). – P. 21–27. <https://doi.org/10.17238/issn2541-8416.2018.18.1.21>.

90. Shettigar R. R., Misra N. M., Patel K. CTAB grafted PAM gel and its application in drilling fluid / *Journal of petroleum science and engineering.* – 2018. – Vol. 160. P. 129–135. DOI: [10.1016/j.petrol.2017.10.040](https://doi.org/10.1016/j.petrol.2017.10.040).

91. Use of Almond Shells and Rice Husk as Fillers of Poly(Methyl Methacrylate) (PMMA) Composites / A. Sabbatini, S. Lanari, C. Santulli, C. Pettinari // *Materials.* – 2017. – Vol. 10. – Iss. 12. – P. 872. doi: [10.3390/ma10080872](https://doi.org/10.3390/ma10080872).

92. Закиров Н.Н. Технологические аспекты повышения надежности и долговечности деталей бурового оборудования / Н.Н. Закиров // *Нефть и газ.* – 2016. – № 4. – С. 56–58.

93. Федосов А.В. К вопросу повышения безопасности при эксплуатации циркуляционной системы очистки бурового раствора / А.В. Федосов, К.Р. Идрисова, Э.К. Юсупова, П.Е. Панькова // Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья. – 2017. – № 2. – С. 50-54.

94. Ткаченко І.В. Розробка технології розділення і очищення вод, що містять нафту / І.В. Ткаченко // Суднові енергетичні установки : наук.-техн. зб. Вип. 40. – Одеса : НУ «ОМА». – 2020. – С. 24-30. DOI : 10.31653/smf340.2020.24-30.

95. Марьянов Д.Н. Обеспечение функциональных свойств и эксплуатационных характеристик технических жидкостей, транспортируемых морскими судами / Д.Н. Марьянов // Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті : Матеріали XII Міжнародної науково-практичної конференції MINTT-2020, 27-29 травня 2020 р. – Херсон : Херсонська державна морська академія. – 2020. – С. 261-2654.

96. Голиков В.А. Методологія наукових досліджень : навчальний посібник / В.А. Голиков, М.А. Козьмїних, О.А. Онищенко. – Одеса : Одес. нац. мор. академія, 2014. – 164 с.

97. Грищук Ю.С. Основы научных исследований / . – Харьков : Нац. техн. ун-т «Харківський політехнічний інститут», 2008. – 232 с.

98. Даренський О.М. Основы научных исследований / О.М. Даренський, Д.А. Фаст, Д.О. Потапов. – Харьков : Укр. держ. ун-т залізн. тр-ту, 2016. – 73 с.

99. Солодовніков В Г. Використання ультразвукової обробки в модульних схемах побудови суднових систем паливопідготовки / В Г. Солодовніков // Суднові енергетичні установки : наук.-техн. зб. Вип. 38. – Одеса : НУ «ОМА», 2018. – С. 158-168.

100. Sagin S.V. Determination of the optimal recovery time of the rheological characteristics of marine diesel engine lubricating oils / S.V. Sagin // Materials of the International Conference “Process Management and Scientific Developments” (Birmingham, United Kingdom, January 16, 2020. Part 4). – P. 195-202. DOI. 10.34660/INF.2020.4.52991

101. Zablotskyi Yu.V. Applying of fuel additives in marine diesel engines / Yu.V. Zablotskyi, A.S. Sagin // Суднові енергетичні установки: науково-технічний збірник. Вип. 43. – Одеса: НУ «ОМА». – 2021. – С. 5 – 17. doi: 10.31653/smf343.2021. 5-17.

102. Kuropyatnyk O.A. The use of bypass exhaust gases to ensure the environmental performance of marine diesel engines / O.A. Kuropyatnyk // Суднові енергетичні установки : наук.-техн. зб. Вип. 38. – Одеса : НУ «ОМА», 2018. – С. 217-228.

103. Sagin S.V. Decrease in mechanical losses in high-pressure fuel equipment of marine diesel engines / S.V. Sagin // Materials of the International Conference “Scientific research of the SCO countries: synergy and integration”. Part 1. August 31, 2019. Beijing, PRC. – P. 139-145. DOI. 10.34660/INF.2019.15.36258.

104. Malakhov O. Improvement of working parameters of ships with the use of water-fuel emulsions / O. Malakhov, M. Kolegaev, D. Malakhova, I. Maslov, I. Brazhnik, R. Gudilko // Technology audit and production reserves. – 2018. – Vol. 6/3(44). – P. 14-20. DOI: 10.15587/2312-8372.2018.152255.

105. Kolegaev M.O. Main ways of tanker inert gas system modernization / M.O. Kolegaev, I.D. Brazhnik // Суднові енергетичні установки: наук.-техн. зб. – 2018. – Вип. 38. – Одеса : НУ «ОМА». – С. 200-216.

106. Малахов А.В. Основные технологические аспекты гидродинамического разделения многофазных потоков / А.В. Малахов, И.В. Ткаченко, В.А. Маслов, О.Е. Гугуев, М.А. Колегаев, С.А. Карьянский // Вісник Нац. техн. ун-ту «Київський політех. ін-т : Серія Машинобудування. – 2010. – № 59. – С. 117-120.

107. Мацкевич Д.В. Поновлення реологічних характеристик мастильних матеріалів суднових дизелів / Д.В. Мацкевич // Суднові енергетичні установки : наук.-техн. зб. Вип. 38. – Одеса : НУ «ОМА», 2018. – С. 116-126.

108. Панкратова Н.Д. Системний аналіз. Теорія та застосування : підручник / Н.Д. Панкратова. – Київ : Наук. думка, 2018. – 347 с.

109. Системний аналіз інформаційних процесів : навчальний посібник / В.М. Варенко, І.В. Братусь, В.С. Дорошенко, Ю.Б. Смольников, В.О. Юрченко. – К. : Університет «Україна», 2013. – 203 с.

110. Коваленко І.І. Вступ до системного аналізу : навчальний посібник / І.І. Коваленко, П.І. Бідюк, О.П. Гожий. – Миколаїв : МДГУ ім. П.Могили, 2004. – 148 с.

111. Чорней Н.Б. Теорія систем і системний аналіз : навчальний посібник / Н.Б. Чорней. – Київ : МАУП, 2005. – 256 с.

112. Особливості системного підходу до вирішення наукових завдань експлуатації суднового обладнання / Богомья В.І., Горбань А.В., Павленко М.А., Тимочко О.І., Тимощук О.М. // За заг. ред. О.М. Тимощук. – Київ : Держ. ун-т інфраструктури та технологій. – 2018. – 305 с.

113. Козьминых А.В. Основы системного анализа судовых энергетических установок : учебное пособие / А.В. Козьминых. – Одесса : Одес. гос. мор. академия, 2000. – 192 с.

114. Катренко А.В. Системний аналіз : підручник / А.В. Катренко. – Львів : Новий Світ -2000, 2011. – 396 с.

115. Поповский А.Ю. Комплексная оценка эксплуатационных характеристик смазочных углеводородных жидкостей / А.Ю. Поповский, С.В. Сагин // Автоматизация судовых технических средств : науч.-техн. сборник. – 2014. – Вып. 20. – С. 74-83.

116. Jo H.J. Comparative numerical and experimental investigation of process viscometry for flows in an agitator with a flat blade turbine impeller / H.J. Jo, W.R. Hwang, Y.J. Kim // Korea Australia rheology journal. – 2020. – Vol. 32. – Iss. 2. – P. 137-144. DOI: 10.1007/s13367-020-0012-7.

117. Мацкевич Д.В. Забезпечення реологічної стійкості судових моторних мастил / Д.В. Мацкевич // Суднові енергетичні установки : наук.-техн. зб. Вип. 40. – Одеса : НУ «ОМА». – 2020. – С. 17-23. DOI : 10.31653/smf340.2020.17-23.

118. Filipshchuk A.N. Technology for Improving Technical, Economic and Ecological Efficiency of Boiler Plants Using Physico-Chemical Correction of the Water-Fuel Emulsions Composition / A.N. Filipshchuk, O.V. Kolbasenko, A.P. Shevtsov, B.V. Dymo // Problems of the Regional Energetics. – 2021. – № 3(51). – P. 62-77. DOI: <https://doi.org/10.52254/1857-0070.2021.3-51.06>

119. Коцкулич Я.С. Бурові промивні рідини / Я.С. Коцкулич, М.І. Оринчак, М.М. Оринчак. – Івано-Франківськ : Факел, 2008. – 500 с.

120. Витвицький В.М. Дослідження впливу форми і розмірів полімерних гранул на їхні трибологічні властивості / В.М. Витвицький, А.Я. Карвацький, І.О. Мікульонок, О.Л. Сокольський // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – 2020. – № 2(75). – С. 52-61. DOI: 10.31471/1993-9973-2020-2(75)-52-61.

121. Physical and Thermal Characterization of Red Mud Reinforced Epoxy Composites: An Experimental Investigation / J. Banjare, Y.K. Sahu, A. Agrawal, A. Satapathy // Procedia Materials Science. – 2014. – Vol. 5. – P. 755-763. doi: 10.1016/j.mspro.2014.07.325.

122. Минаков А.В. Исследование влияния добавок наночастиц на свойства буровых растворов / А.В. Минаков, Е.И. Михиенкова, В.А. Жигарев, А.Л. Неверов, В.Я. Рудяк // Коллоидный журнал. – 2018. – Т. 80. – № 4. – С. – 435-444. DOI: 10.1134/S0023291218040092.

123. Левич В.Г. Физико-химическая гидромеханика. – Изд. 3-е, испр. и доп. / В.Г. Левич. – М.-Ижевск : Институт компьютерных исследований, 2016. – 708 с.

124. Sule I. Nonlinear model predictive control of gas kick in a managed pressure drilling system / I. Sule, S. Imitiaz, F. Khan, S. Butt // Journal of petroleum science and engineering. – 2019. – Vol. 174. – P. 1223-1235. DOI: 10.1016/j.petrol.2018. 11.046.

125. Реологические модели // FluidsPro [Электронный ресурс]. URL: <http://fluidspro.ru/reologiya-i-gidrodinamika/reologicheskie-modeli/>(22.11.2021).

126. Поповский А.Ю. Оценка эксплуатационных свойств смазочно-охлаждающих жидкостей судовых технических средств / А.Ю. Поповский, С.В. Сагин // Автоматизация судовых технических средств: науч.-техн. сборник. – 2016. – Вып. 22. – С. 66-74.

127. Малахов А.В. Специфика управления параметрами многофазного потока при его сепарации / А.В. Малахов, В.В. Леонов, С.Н. Старостин, В.А. Маслов // Науковий вісник Херсонської державної морської академії. – 2013. – № 1(8). – С. 45-53.

128. Бреки А.Д. О зависимости вязкости масел от наличия в них наночастиц твердых смазочных материала и взвешенных частиц износа при использовании эмпирического уравнения Вальтера / А.Д. Бреки, А.Е. Гвоздев // Известия Тульского гос. ун-та. Технические науки. – 2017. – Вып. 3. – С. 90-98.

129. Бахтизин Р.Н. Исследование процесса теплообмена при свободной конвекции в неоднородных средах / Р.Н. Бахтизин, А.В. Бакиев // Вестник Академии Наук РБ. – 2014. – Т. 19. – № 4. – С. 44-49.

130. Menezes R.R. Use of statistical design to study the influence of CMC on the rheological properties of bentonite dispersions for water-based drilling fluids / R.R. Menezes, L.N. Marques, L.A. Campos, H.S. Ferreira, L.N.L. Santana, G.A. Neves // Applied Clay Science. – 2010. – Vol. 49. – Iss. 1-2. – P. 13-20. DOI: 10.1016/j.clay.2010.03.013.

131. Malahov A. Efficiency improvement of ships operation by water-fuel emulsion using / A.Malahov, R.Gudilko, A.Palagin, I.Maslov // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2016. – № 3(8). – С. 48-53.

132. Заблоцький Ю.В. Зниження теплової напруженості суднових дизелів за рахунок використання присадок до палива / Ю.В. Заблоцький // Суднові енергетичні установки : наук.-техн. зб. Вип. 38. – Одеса : НУ «ОМА», 2018. – С. 76-87.

133. Vipulanandan C. Hyperbolic rheological model with shear stress limit for acrylamide polymer modified bentonite drilling muds / C. Vipulanandan,

A.S. Mohammed // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2014. – Vol. 122. – P. 38-47. DOI: 10.1016/j.petrol.2014.08.004.

134. Мацкевич Д.В. Регенерація експлуатаційних властивостей моторних мастил судових дизелів / Д.В. Мацкевич // Вісник Одеського національного морського університету : Зб. наук. праць, 2020. – Вип. 1(61). – С. 121-130. doi.org/10.47049/2226-1893-2020-1-121-130.

135. Кирсанов Е.А. Неньютоновское поведение структурированных систем / Е.А. Кирсанов, В.Н. Матвиенко. – М. : Техносфера, 2016. – 384 с.

136. Малахов А.В. Экспериментальное изучение гидродинамического процесса суперкавитации при сепарации судовых льяльных вод / А.В. Малахов, И.В. Ткаченко, О.Е. Гугуев // Вісник Одеського національного морського університету: Зб. наук. праць. – 2009.– Вип. 27. – С. 110-116.

137. Sit M.L. Control of Heat Exchanger with Variable Heat Transfer Surface Area / M.L. Sit, V.I. Patsiuk, A.A. Juravliov, V.I. Burciu, D.V. Timchenko // Problems of the Regional Energetics. – 2019. – Vol. 1(39). – P. 90-101. DOI: 10.5281/zenodo.2650427.

138. Малахов А.В. Моделирование процесса разрушения воздушных пузырей при заполнении замкнутых объемов / Малахов А.В., Палагин А.Н., Маслов И.З. // Вісник Херсонського національного технічного університету. – 2017. – № 2(61). – С. 76-83.

139. Livescu S. Mathematical modeling of thixotropic drilling mud and crude oil flow in wells and pipelines – A review / S. Livescu // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2012. – Vol. 98-99. – P. 174-184. DOI: 10.1016/j.petrol.2012.04.026.

140. Малахов А.В. Автоматизация процесса сепарации многофазных потоков на основе гидродинамической суперкавитации / Малахов А.В., Стрельцов О.В., Осташко Е.А., Старостин С.Н. // Электротехнические и компьютерные системы. – 2013. – № 9. – С. 78-83.

141. Малахов А.В. Метод принудительной вентиляции трюмов на танкерах / А.В. Малахов, М.А. Колегаев, И.Д. Бражник // Вчені записки

Таврійського національного університету ім. В.І.Вернадського. Серія «Технічні науки». – 2018. – Т. 29(68). – № 3. – С. 166-169.

142. Бражник И. Д. Модернизация процесса вентиляции грузовых трюмов танкера с помощью системы инертных газов // Вчені записки Таврійського національного університету ім. В.І. Вернадського. Серія: «Технічні науки». – 2019. – Т. 30(69) – № 5. – С.129-133.

143. Сагін С.В. Визначення розподілу тиску в шарі неньютонівських мастил у суднових енергетичних установках / С.В. Сагін, М.О. Кривий // Вісник Одеського національного морського університету : Зб. Наук. праць, 2020. – № 2(62). – С. 160-170. DOI 10.47049/2226-1893-2020-1-160-170.

144. Васильев А.П. Конвективный теплообмен в ламинарном потоке / А.П. Васильев // Вестник Одесского гос. ун-та. – 2003. – № 3. – С. 97-101.

145. Сагін С.В. Зниження енергетичних втрат в прецизійних парах паливної апаратури суднових дизелів / С.В. Сагін // Суднові енергетичні установки : наук.-техн. зб. Вип. 38. – Одеса : НУ «ОМА», 2018. – С. 139-149.

146. Цветков Д.О. Операторный подход к задаче о малых движениях стратифицированных жидкостей / Д.О. Цветков // Таврический вестник информатики и математики. – 2015. – № 4(29). – С. 77-99.

147. Конесев Г.В. Применение метода ЯМР релаксометрии для оценки ингибирующих свойств буровых растворов на водной основе / Г.В. Конесев, А.Х. Агниуллин, М.Е. Логинов, Э.В. Бабушкин, М.Г. Буянова, А.А. Кунакасов // Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2020. – № 3(125). – С. 20-28. DOI: 10/17122/ntj-oil-2020-3-20-28.

148. Ключев Н.И. Движение капли в градиентном потоке / Н.И. Ключев, Х.И. Мингулов, Н.А. Бурмистров // Вестник Самарского гос. ун-та. Естественная серия. – 2012. – № 3/2(94). – С. 24-28.

149. Федюшкин А.И. Влияние чисел Рэлея, Прандтля и граничных условий на конвективные течения жидкости в горизонтальных слоях /

А.И. Федюшкин // Математическое моделирование и численные методы. – 2020. – № 1. – С. 28-44. DOI: 10.18698/2309-3684-2020-1-2844.

150. Карьянский С.А. Постановка задач экспериментального исследования стратификации двухфазного потока типа «грунт-вода» / С.А. Карьянский // Судовые энергетические установки: научно-технический сборник. Вып. 23.–Одесса: ОНМА. – 2009. – С. 37-42.

151. Малахов О.В. Характеристики процесу тепло-масопереносу в застосуванні до вентиляції інертними газами вантажних трюмів танкерів / О.В. Малахов, М.О. Колегаєв, І.Д. Бражнік, К.А. Ліхогляд // Суднові енергетичні установки: наук.-тех. зб. Вип. 39. – Одеса : Нац. ун-т «Одеська мор. академія». – 2019. – С. 56-68. DOI: 10.31653/smf39.2019.56-68.

152. Сагін С.В. Динаміка суднових дизелів під час використання моторних мастил з різними структурними характеристиками / С.В. Сагін, Т.О. Столярик // Автоматизація суднових технічних засобів : наук. -техн. зб. – 2021. – Вип. 27. – Одеса : НУ «ОМА». – С. 108 - 119. DOI: 10.31653/1819-3293-2021-1-27-108-119.

153. Multiparametric optimization of laser cutting of steel sheets / A.E. Gvozdev, I.V. Golyshev, I.V. Minayev, A.N. Sergeyev, N.N. Sergeyev, I.V. Tikhonova, D.M. Khonelidze, A.G. Kolmakov // Inorganic Materials: Applied Research. – 2015. – Vol. 6. – № 4. – P. 305-310.

154. Karianskyi S.A. Hydrodynamic pulp separator for dredging vessels / S.A. Karianskyi // Судовые энергетические установки: науч.-тех. сб. Вып. 29. – Одесса : ОНМА. – 2012. – С. 35-40.

155. Ниркова Л.І. Вплив корозійної активності середовища на швидкість залишкової корозії сталі в нормованому діапазоні захисних потенціалів / Л.І. Ниркова, С.О. Осадчук, А.В. Клименко // Науковий вісник Івано-Франківського нац. тех. ун-ту нафти і газу. – 2020. – № 1(48). – 7-15. DOI: 10.31471/1993-9965-2020-1(48)-7-15.

156. Popovskii A.Y. Structural properties and model rheological parameters of an ELC layer of hexadecane / A.Y. Popovskii, B.A. Altoiz, V.F. Butenko //

Journal of Engineering Physics and Thermophysics. – 2019. – № 92(3). – P. 703-710.

157. Сагін С.В. Аналіз експлуатаційних характеристик моторних мастил судових дизелів / С.В. Сагін, Т.О. Столярик // Суднові енергетичні установки: науково-технічний збірник. Вип. 43. – Одеса: НУ «ОМА». – 2021. – С. 69 - 80. doi: 10.31653/smf343.2021.69-80.

158. Поповський О.Ю. Експлуатаційні характеристики нових мастильних матеріалів біологічного походження / О.Ю. Поповський, Б.А. Алтоїз, О.Ф. Бутенко, О.К. Копійка, R. Laurencas // Фізика аеродисперсних систем. – 2021. – № 59. – С. 201-211. DOI: 10.18524/0367-1631.2021.59.236756.

159. Цветков Д.О. Малые движения системы из двух вязких стратифицированных жидкостей / Д.О. Цветков // Таврический вестник информатики и математики. – 2016. – № 3(32). – С. 101-109.

160. Altoiz B.A. Equilibrium parameters of a structured n-hexadecane layer / B.A. Altoiz, A.Yu. Popovskii, A.F. Butenko // Фізика аеродисперсних систем. – 2017. – № 54. – С. 35-44.

161. Сагин С.В. Исследование корреляционной взаимосвязи жидкокристаллических свойств граничных смазочных слоев и реологических характеристик моторных масел судовых дизелей / С.В. Сагин // Судовые энергетические установки: науч.-техн. сб. – 2014. – № 33. – Одесса: ОНМА. – С. 67-76.

162. Билюнас М.В. Свободные внутренние волны в неоднородном течении с вертикальным сдвигом скорости / М.В. Билюнас, С.Ф. Доценко // Морской гидрофизический журнал. – 2012. – № 1. – С. 3-16.

163. Михайленко В.І. Залежність товщини ЕРК шару від температури 1. Естафетна модель / В.І. Михайленко, К.С. Шакур, О.Ю. Поповський, О.Ф. Бутенко // Фізика аеродисперсних систем. – 2014. – № 51. – С. 5-11.

164. Михайленко В.І. Залежність товщини ЕРК шару від температури 2. Двохкомпонента модель / В.І. Михайленко, К.С. Шакур, О.Ю. Поповський, О.Ф. Бутенко // Фізика аеродисперсних систем. – 2014. – № 51. – С. 12-17.
165. Общая химия. Биофизическая химия. Химия биогенных элементов / Ю.А. Ершов, В.А. Попков, А.С. Берлянд. – М. : Юрайт, 2020. – 360 с.
166. Клындюк А.И. Поверхностные явления и дисперсные системы / А.И. Клындюк. – Минск : БГТУ, 2011. – 320 с.
167. Кривий М.О. Визначення впливу властивостей моторних мастил на розподіл тиску в парах ковзання судових дизелів / М.О. Кривий, С.В. Сагін // Суднові енергетичні установки: науково-технічний збірник. Вип. 43. – Одеса: НУ «ОМА». – 2021. – С. 18 - 24. doi:10.31653/smf343.2021.18-24
168. Морські бурові платформи: Перший том. Монографія / В.Д. Макаренко, С.Ю. Максимов, Ю.Л. Винников, Ю.М. Кусков, М.О. Харченко. Під ред. проф. В.Д. Макаренко. – К. : Редакційно-видавничий відділ Нац. ун-ту біоресурсів і природовикористання України. – 2020. – 420 с.
169. Морські бурові платформи: Другий том. Монографія / В.Д. Макаренко, С.Ю. Максимов, Ю.Л. Винников, Ю.М. Кусков, М.О. Харченко. Під ред. проф. В.Д. Макаренко. – К. : Редакційно-видавничий відділ Нац. ун-ту біоресурсів і природовикористання України. – 2020. – 424 с.
170. Карьянский С.А. Обеспечение эксплуатационных характеристик высокоплотных технических жидкостей при их транспортировке морскими судами / С.А. Карьянский, Д.Н. Марьянов // Вісник Одеського національного морського університету : Зб. наук. праць, 2020. – Вип. 1(61). – С. 97-105. doi.org/10.47049/2226-1893-2020-1-97-105.
171. Сагин С.В. Контроль реологических характеристик судовых моторных масел в процессе эксплуатации среднеоборотных дизелей / С.В. Сагин // Austria-science. – 2017. – № 7. – С. 29-33.
172. Maryanov D. Control and regulation of the density of technical fluids during their transportation by sea specialized vessels / D. Maryanov // Technology

Audit and Production Reserves. – 2022. – № 1(2(63)). – P. 19-25. doi: <http://doi.org/10.15587/2706-5448.2022.252336>.

173. Самонов С.Ф. Підвищення ефективності та надійності комбінованих судових пропульсивних установок / С.Ф. Самонов, О.М. Рак, О.В. Глазєва // Вісник НТУ «Харківський політехнічний інститут». Серія: Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії. – 2020. – № 3(1357). – С. 29-35. DOI: 10.20998/2409-9295.2020.3.05.

174. Сагин С.В. Особенности подготовки масляной системы судовых дизелей, работающих на винт регулируемого шага, при выходе судна из сухого дока / С.В. Сагин, Д.В. Мацкевич // Проблемы техники: наук.-виробн. журнал. – 2011. – № 3. – Одесса: ОНМУ. – С. 50-56.

175. Карьянский С.А. Регулирование плотности бурильной суспензии при ее транспортировке судами класса Platform Supply Vessels / С.А. Карьянский, Д.Н. Марьянов // Автоматизация судовых технических средств : наук. -техн. зб. – 2021. – Вип. 27. – Одеса : НУ «ОМА». – С. 52 - 62. DOI: 10.31653/1819-3293-2021-1-27-52-62.

176. Кирилычев А.А. Решение задачи нормирования ходового времени и расхода топлива морского судна / А.А. Кирилычев, Н.В. Ивановский, С.П. Голиков, Д.Г. Куценко, В.А. Зеленцов // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2012. – № 6/3(60). – С. 28-32.

177. Горб С.И. Оптимизация главного двигателя на режиме экономического хода судна / С.И. Горб // Автоматизация судовых технических средств: науч.-техн. сб. – 2019. – Вып. 25. – Одесса : НУ «ОМА». – С. 17-34.

178. Марьянов Д.Н. Повышение эффективности функционирования специальных систем специализированных морских судов / Д.Н. Марьянов // Universum: Технические науки : электрон. научн. журн. – 2020. – № 4(73). URL: <http://7universum.com/ru/tech/archive/item/9291>.

179. Марьянов Д.Н. Совершенствование эксплуатации системы перевозки бурильной суспензии на судах, обеспечивающих работу нефтяных

платформ / Д.Н. Марьянов // Матеріали 12-ї Міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні енергетичні установки на транспорті і технології та обладнання для їх обслуговування», 06-08 вересня 2021 р. – Херсон : Херсонська державна морська академія. – 2021. – С. 170-173.

180. Мар'янов Д.М. Підтримка густини та седиментаційної стійкості технічних рідин, що транспортуються морськими суднами / Д.М. Мар'янов // Матеріали X Міжнародної науково-технічної конференції «Суднова енергетика: стан та проблеми», 4–5 листопада 2021 року. Націон. ун-т кораблебудування, Миколаїв, 2021. – С. 231-234.

181. Мар'янов Д.М. Підтримка функціональних характеристик багатокомпонентних технічних рідин / Д.М. Мар'янов // Матеріали 11-ї Міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні енергетичні установки на транспорті і технології та обладнання для їх обслуговування», 08-10 вересня 2020 р. – Херсон : Херсонська державна морська академія. – 2020. – С. 161-164.

182. Мар'янов Д.М. Обробка вуглеводних рідин під час їх перевезення на суднах річкового та морського транспорту // Матеріали науково-технічної конференції «Морський та річковий флот : експлуатація і ремонт», 25.03.2021 -26.03.2021. – Одеса : Національний університет «Одеська морська академія», 2021.– С. 97-99.

183. Крюков Ю.А. Моделирование движения сферической капли в ламинарном пограничном слое Блазиуса с помощью пакета ANSYS FLUENT / Ю.А. Крюков // Вестник Самарского гос. ун-та. – 2015. – № 3(125). – С. 97-105.

184. ANSYS FLUENT 12.0 Theory Guide, 2009. URL: <http://orange.engr.ucdavis.edu/Documentation12.0/120/FLUENT/flth.pdf> (дата звернення: 24.01.2021).

185. ANSYS ICEM CFD User Manual, 2012. URL:http://ptechgroup.ir/Virtual_Education/Mechanics/ICEM-CFD/PTEC-ICEM_CFD_14.5_User_Guide.pdf (дата звернення: 24.01.2021).

186. Промтов М.А. Изменение фракционного состава нефти при гидроимпульсной кавитационной обработке / М.А. Промтов // Вестник Тамбовского гос. тех. ун-та. – 2017. – Т. 23. – № 3. – С. 412-419. DOI: 10.17277/vestnik.2017.03.pp.412-419.

187. Солодовников В.Г. Обеспечение требований энергетической эффективности при подготовке тяжелых топлив для судовых двигателей внутреннего сгорания / В.Г. Солодовников // Austria-science. – 2017. – № 7. – С. 33-37.

188. Zablotsky Yu.V. Enhancing Fuel Efficiency and Environmental Specifications of a Marine Diesel When using Fuel Additives / Yu.V. Zablotsky, S.V. Sagin // Indian Journal of Science and Technology. – 2016. – Vol. 9. – Iss. 46. – P. 353-362. DOI: 10.17485/ijst/2016/v9i46/107516.

189. Нуруллаев В.Х. О перспективности применения кавитационных технологий при транспортировке и переработке нефти / В.Х. Нуруллаев, С.Т. Алиев // Известия высших технических учебных заведений Азербайджана. – 2011. – № 5(75). – С. 23-28.

190. Фролов В.В. Деструкция углеводородных соединений ультразвуком / В.В. Фролов, И.В. Мозговой // Технические науки – от теории к практике. – 2012. – № 10. – С. 136-140.

191. Нуруллаев В.Х. Условия образования кавитационных зон и их действие на физико-химические характеристики нефтей / В.Х. Нуруллаев // Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья. – 2017. – № 1. – С. 38-42.

192. Котов В.С. Разработка схемы смесителя-гомогенизатора гидродинамического типа / В.С. Котов, А.А. Кривошеев, Р.К. Резникова // Вестник гос. ун-та морского и речного флота им. адм. С.О. Макарова. – 2021. – Т. 13. – № 4. – С. 569-574. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-4-569-574.

193. Вершинина С.В. Применение гидродинамической кавитационной обработки высоковязких нефтей с целью повышения эффективности

транспортировки / С.В. Вершинина, А.Э. Бранд, Н.А. Мостовая / Нефть и газ. – 2015. – № 4. – С. 97-101.

194. Промтов М.А. Влияние гидроимпульсной обработки на реологические параметры нефти / М.А. Промтов, Н.Ц. Гатапова, В.Я. Борщев, А.Н. Колиух, А.Ю. Степанов, О.А. Шеина // Вестник ТГТУ. – 2020. – Т. 26. – № 2. – С. 243-253. DOI: 10.17277/vestnik.2020.02.pp.243-253.

195. Солодовніков В.Г. Забезпечення технічного стану суднових дизелів шляхом кавітаційної обробки палива / В.Г. Солодовніков // Суднові енергетичні установки : наук.-техн. зб. Вип. 40. – Одеса : НУ «ОМА». – 2020. – С. 65-69. DOI : 10.31653/smf340.2020.88-94.

196. Заблоцький Ю.В. Зниження теплової напруженості суднових дизелів за рахунок використання присадок до палива / Ю.В. Заблоцький // Суднові енергетичні установки : наук.-техн. зб. Вип. 38. – Одеса : НУ «ОМА», 2018. – С. 76-87.

197. Марченко О.О. Вдосконалення процесу очищення суднових важких палив / О.О. Марченко, С.В. Сагін // Суднові енергетичні установки: науково-технічний збірник. Вип. 41. – Одеса: НУ «ОМА». – 2020. – С. 10-14. DOI : 10.31653/smf341.2020.10-14.

198. Кравець А.М. Конструкція системи диспергування дизельного палива підвищеної ефективності / А.М. Кравець, В.Г. Кравець, О.І. Прийма // Вісник Харківського нац. автомобільно-дорожнього ун-ту. – 2012. – Вип. 57. – С. 316-320.

199. Tao R. Reducing the Viscosity of Crude Oil by Pulsed Electric or Magnetic Field / R. Tao, X. Xu // Energy & Fuels. – 2006. – № 20(5). – P. 2046-2051.

200. Ved V.E. Energy Efficient Heat Exchange Network for the Oil Vacuum Distillation Facility / V.E. Ved, M.V. Ilchenko, A.N. Myronov // Problems of the Regional Energetics. – 2019. – Vol. 3(44). – P. 101-112. DOI: 10.5281/zenodo.3562175.

201. Заливин В.Г. Гидродинамическая кавитация как средство регулирования качественных показателей буровых растворов / В.Г. Заливин, М.Г. Руденко // Известия Сибирского отделения Секции наук о Земле РАЕН. – 2010. – № 2(37). – С. 147-153.

202. Sagin S.V. Marine Slow-Speed Diesel Engine Diagnosis with View to Cylinder Oil Specification / S.V. Sagin, O.V. Semenov // American Journal of Applied Sciences. – 2016. – Vol. 13. – Iss. 5. – P. 618-627. DOI: 10.3844/ajassp.2016.618.627.

203. Сагін С.В. Зниження механічних втрат у суднових середньообертових дизелях за рахунок оптимізації роботи циркуляційних систем мащення / С.В. Сагін // Вісник Одеського національного морського університету : Зб. наук. праць, 2020. – Вип. 1(61). – С. 87-96. doi.org 10.47049/2226-1893-2020-1-87-96.

204. Ратайчук О.В. Підвищення ефективності процесу наддува суднових дизелів / О.В. Ратайчук, С.В. Сагін // Суднові енергетичні установки: науково-технічний збірник. Вип. 41. – Одеса: НУ «ОМА». – 2020. – С. 15-19. DOI : 10.31653/smf341.2020.15-19.

205. Поліник М.М. Технологія буріння нафтогазових свердловин / М.М. Поліник. – Полтава : Полтавський національний технічний університет ім. Юрія Кондратюка, 2021 – 294 с.

206. Оринчак М.І. Удосконалення технології запобігання обвалювань та осипань стінок свердловини / М.І. Оринчак, І.І. Чудик, О.С. Бейзик, О.І. Кирчей // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – 2015. – № 2(55). – С. 35-42.

207. Sagin S.V. The investigations of the influence of ultrasonic fuel processing on sulfur wear of details in cylinder group of marine diesel engines / S.V. Sagin, V.G. Solodovnikov // European Science and Technology : material of the XVI international research and practice conference, Munich, March 14th – 15th, 2017. – Munich, Germany 2017. – P. 61-74.

208. Zablotsky Yu.V. Use of organic coatings to increase the reliability of fuel injection equipment work for marine diesel engines / Yu.V. Zablotsky // European Science and Technology : material of the XVI international research and practice conference, Munich, March 14th – 15th, 2017. – Munich, Germany. – 2017. – P. 104-112.

209. Промтов М.А. Перспективы применения кавитационных технологий для интенсификации химико-технологических процессов / М.А. Промтов // Вестник Тамбовского гос. тех. ун-та. – 2008. – Т. 14. – № 4. – С. 861-868.

210. Kuropyatnyk O.A. Exhaust Gas Recirculation as a Major Technique Designed to Reduce NO_x Emissions from Marine Diesel Engines / O.A. Kuropyatnyk, S.V. Sagin // OUR SEA : International Journal of Maritime Science & Technology. – 2019. – Vol. 66. – Iss. 1. – P. 1-9. <https://doi.org/10.17818/NM/2019/1.1>.

211. Sagin S. Analysis of mechanical energy losses in marine diesels / S. Sagin, V. Madey, T. Stoliaryk // Technology Audit and Production Reserves. – 2021. – № 5 (2 (61)). – P. 26-32. doi: <http://doi.org/10.15587/2706-5448.2021.239698>.

212. Malahov A. Improvement of ship ballasting system / A. Malahov, A. Palagin, I. Maslov, R. Gudilko // Technology Audit and Production Reserves. – 2017. – № 4/1(36). – P. 25-29. DOI: 10.15587/2312-8372.2017.109087.

213. Букарь Н.В. Седиментационная устойчивость и вязкость систем, соержащий водные СОЖ (смазочно-охлаждающие жидкости) на основе графита и нитрита бора / Н.В. Букарь, Н.В. Кудряшев, В.В. Смагина, А.В. Кухаренко, Г.В. Авраменко // Успехи в химии и химической технологии. – 2008. – Том XXII. – № 6(86). – С. 85-88.

215. Guo C. A borehole imaging method using electromagnetic short pulse in oil based MUD / C. Guo, R.C. Liu // IEEE geosciences and remote sensing letters. – 2010. – Vol. 7. – Iss. 4. – P. 856-860. DOI: 10.1109/LGRS.2010.2049638.

216. Wan Hong Y. Active mud line pumping, design, testing and future possibilities in rig design / Y. Wan Hong, R. Van Kuilenburg // Society of petroleum engineers – IADC/SPE Drilling Conference and Exhibition, DC 2018, Fort Worth, Texas, USA, March 2018. doi.org/10.2118/189579-MS.

217. Ведрученко В.Р. Снижение экономического ущерба от вредных выбросов тепловых двигателей использованием альтернативных видов топлива / В.Р. Ведрученко, Н.В. Жданов, Е.С. Лазарев // Омский научный вестник. – 2013. – № 2(120). – С. 236-240.

218. Побережний Р.В. Забезпечення екологічних показників дизелів суден річкового та морського транспорту / Р.В. Побережний, С.В. Сагін // Суднові енергетичні установки: науково-технічний збірник. Вип. 41. – Одеса: НУ «ОМА». – 2020. – С. 5 - 9. DOI : 10.31653/smf340.2020.5-9.

219. Кириллов О.Л. Уточнення критерію безпеки при аналізі розвитку розрядних процесів в технології заповнення нафтопродуктами об'ємів / О.Л. Кириллов, О.М. Фролов, С.Р. Селіверстова, І.А. Селіверстов // Вісник Херсонського нац. тех. ун-ту. – 2021. – № 4(79). – С. 31-37. <https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2021.4.3>.

220. Карьянский С.А. Поддержание реологических характеристик технических жидкостей при их длительной транспортировке / С.А. Карьянский, Д.Н. Марьянов // Матеріали II Міжнародної науково-практичної морської конференції кафедри СЕУ і ТЕ Одеського національного морського університету (MPP&O-2020 –Marine Power Plants and Operation), квітень 2020. – Одеса : Одеський національний морський університет. – С. 202-206.

221. Maryanov D. Development of a method for maintaining the performance of drilling fluids during transportation by Platform Supply Vessel / D. Maryanov // Technology Audit and Production Reserves. – 2021. – №5(2(61)). – С. 15-20. doi: <http://doi.org/10.15587/2706-5448.2021.239437>.

222. Нуруллаев В.Х. Транспорт нефтей с применением кавитационных технологий и определение плотности с учетом обводненности /

В.Х. Нуруллаев, Г.Г. Исмаилов // Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья. – 2015. – № 1. – С. 7-12.

223. Zhang J. Study on wellbore temperature of riserless MUD recovery system by CFD approach and numerical calculation / J. Zhang, X. Tang, G. Mao, P. Wang // Petroleum. – 2020. – Vol. 6. – №. 2. – PP. 163-169. DOI: 10.1016/j.petlm.2019.06.006.

224. Куропятник А. А. Управление выпускными газами судовых дизелей для обеспечения экологических показателей / А.А. Куропятник, С. В. Сагин // Автоматизация судовых технических средств : науч.-техн. сборник, 2018. – Вып. 24. – С. 72-80.

225. Мар'янов Д.М. Удосконалення системи зберігання та циркуляції бурильної суспензії на судах типу Platform Supply Vessel / Д.М. Мар'янов // Суднові енергетичні установки: науково-технічний збірник. Вип. 43. – Одеса: НУ «ОМА». – 2021. – С. 54 - 68. doi: 10.31653/smf343.2021.54-68.

226. Сагин С.В. Определение диапазона стратификации вязкости смазочного материала в трибологических системах судовых дизелей / С.В. Сагин // Вісник Одеськ. нац. мор. ун-ту, 2019. – Вип. 1(58). – С. 89-100.

227. Мар'янов Д.М. Зниження енергетичних втрат в системі транспортування бурильної суспензії суден класу PSV / Д.М. Мар'янов // Матеріали науково-технічної конференції «Морський та річковий флот : експлуатація і ремонт», 24.03.2022 -25.03.2022. – Одеса : Національний університет «Одеська морська академія», 2022.– С. 97-99.

228. Maryanov D. Reduced energy losses during transportation of drilling slurry by Platform Supply Vessels / D. Maryanov // Technology Audit and Production Reserves. – 2022. – № 2(2(63)). – С. 19–25. doi: <http://doi.org/10.15587/2706-5448.2022.252336>.

229. Camassa R. Optimal two-layer approximation for continuous density stratification / R. Camassa, R. Tiron // Journal of fluid mechanics. – 2011. – Vol. 669. –P. 32-34. DOI: 10.1017/S0022112010004891

230. Lahoida A. Development of an automated system of control over a drilling MUD pressure at the inlet to a well / A. Lahoida, V. Boryn, G. Sementsov, V. Sheketa // *Eastern-European journal of enterprise technologies*. – 2020. – Vol. 4. – Iss. 2-106. – P. 82-94. DOI: 10.15587/1729-4061.2020.209844.

231. Лебеде́нко Ю.О. Адаптивна система керування комбінованим пропульсивним комплексом з нечітким регулятором / Ю.О. Лебеде́нко, О.К. Колебанов, В.В. Даник // *Вісник Херсонського нац. тех. ун-ту*. – 2021. – № 2(77). – С. 30-37. <https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2021.2.3>.

232. Busher V. Synthesis and technical realization of control systems with discrete fractional integral-differentiating controllers / V. Busher, A. Aldairi // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. – 2018. – № 4(2(94)). – P. 63-71. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.139892>.

233. Горб С.И. Повышение эффективности работы главного двигателя корректировкой упора гребного винта / С.И. Горб, А.К. Сандлер, Н.И. Будуров // *Автоматизація суднових технічних засобів : наук. -техн. зб.* – 2019. – Вип. 25. – Одеса : НУ «ОМА». – С. 35-52. DOI: 10.31653/1819-3293-2019-1-25-35-52.

234. Zablotsky Y.V. The use of chemical fuel processing to improve the economic and environmental performance of marine internal combustion engines / Yu. V. Zablotsky // *Materials of the International Conference “Scientific research of the SCO countries: synergy and integration”*. Part 1. August 31, 2019. Beijing, PRC. – P. 131-138. DOI. 10.34660/INF.2019.15.36257.

235. Сагін С.В. Робота суднового дизеля на біодизельному паливі / С.В. Сагін, В.В. Мадей, А.С. Сагін // *Автоматизація суднових технічних засобів : наук. -техн. зб.* – 2021. – Вип. 27. – Одеса : НУ «ОМА». – С. 93 - 107. DOI: 10.31653/1819-3293-2021-1-27-93-107.

236. Иванников В.И. Реометрия буровых растворов / В.И. Иванников // *Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море*. – 2007. – № 2. – С. 17-25.

237. Denney D. Drilling Automation: An Automatic Trajectory-Control System / D. Denney // *Journal of Petroleum Technology*. – 2011. – № 63(12). – P. 84-87. doi: <https://doi.org/10.2118/1211-0084-jpt>.

238. Савельєва О.С. Застосування інформаційних технологій у суднових технологічних процесах / О.С. Савельєва, Д.О. Малахова // *Суднові енергетичні установки : наук.-техн. зб. Вип. 39*. – Одеса : НУ «ОМА». – 2019. – С. 78-88. DOI :10.31653/smf39.2019.78-88.

239. Іванов С.В. Ідентифікація параметрів математичної моделі судна для забезпечення автоматичного керування в умовах переходу / С.В. Іванов, П.Б. Олійник, В.М. Теут // *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. – 2015. – № 3/4(75). – С. 32-36. DOI: 10.15587/1729-4061.2015.42139.

240. Banazadeh A. Frequency domain identification of the Nomoto model to facilitate Kalman filter estimation and PID heading control of a patrol vessel / A. Banazadeh, M.T. Ghorbani // *Ocean Engineering*. – 2013. – Vol. 72. – P. 344-355. doi: 10.1016/j.oceaneng.2013.07.003.

241. Budashko V.V. Ship's power plants of combined propulsion complexes: concepts, technologies, researching : [monograph] / V.V. Budashko. – Одеса : НУ «ОМА», 2020. – 136 p.

242. Green S. Full-scale Deep Well Drilling Simulation / S. Green // *Petroleum Drilling Technologies*. – 2011. – № 39(3). – P. 1-5.

243. Sagin A.S. Reliability maintenance of fuel equipment on marine and inland navigation vessels / A.S. Sagin, Yu.V. Zablotskyi // *Austrian Journal of Technical and Natural Sciences. Scientific journal*. – 2021. – № 7–8 (July – August). – P. 14-17. <https://doi.org/10.29013/AJT-21-7.8-14-17>.

244. Тимків О.В. Сучасні засоби діагностування суднових систем / О.В. Тимків, В.Г. Денісов, Б.І. Гнатюк // *Суднові енергетичні установки : наук.-техн. зб. Вип. 40*. – Одеса : НУ «ОМА». – 2020. – С. 65-69. DOI : 10.31653/smf340.2020.65-69.

245. Заблоцький Ю.В. Підвищення економічності роботи суднових дизелів / Ю.В. Заблоцький // Суднові енергетичні установки : наук.-техн. зб. Вип. 40. – Одеса : НУ «ОМА». – 2020. – С. 12-16. DOI : 10.31653/smf340.2020.12-16.

246. Зверьков Д.О., Сагін С.В. Зниження механічних втрат у суднових дизелях / Д.О. Зверьков, С.В. Сагін // Суднові енергетичні установки: науково-технічний збірник. Вип. 41. – Одеса: НУ «ОМА». – 2020. – С. 20-25. DOI : 10.31653/smf341.2020.20-25.

247. Maryanov D. Optimization of the work of Platform Supply-class Vessel / D. Maryanov, S. Karianskyi // Student International Scientific Conference Batumi Navigation Teaching University, Batumi, Georgia, 17.05.2022. – P. 55-58.

ДОДАТОК

Акти впровадження результатів дисертаційного дослідження

	Document Title	Management System Checklist			
	Chapter Title	Quarterly Condition Report			
	Document No.	OFFTEC 16			
	Revision Date	APR 2021	Revision No.	01	Page 1 of 1

АКТ

про використання результатів дисертаційної роботи

Мар'янова Дениса Миколайовича

«Удосконалення системи зберігання та циркуляції бурильної суспензії на суднах типу PSV»

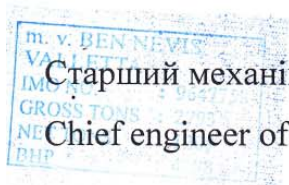
Цей акт складений у том, що удосконалена система зберігання та циркуляції бурильної суспензії, що забезпечує її додаткову примусову Х-подібну циркуляцію, яка запропонована у дисертаційній роботі Мар'янова Дениса Миколайовича «Удосконалення системи зберігання та циркуляції бурильної суспензії на суднах типу PSV», була випробувана та впроваджена на спеціалізованому судні m/v “Ben Nevis” (IMO №9647758). Результати її використання призвели до наступних результатів:

моніторинг густини бурильної суспензії під час її транспортування, пов'язаного з 30-ти годинним морським переходом до нафтовидобувної платформи, підтвердив, що відхилення густини за вказаний час від його початкового значення не перевищує 8 %;

час перекачування бурильної суспензії на нафтовидобувну платформу під час забезпечення технологічного процесу розвантаження судна скорочується з 7,1 до 3,2 годин.

Капітан т/х «Ben Nevis»
Master of m/v “Ben Nevis”

 Крістіан Ходж
Christian Hogge

 Старший механік т/х «Ben Nevis»
Chief engineer of m/v “Ben Nevis”

 Андрій Сапцов
Andriy Saptsov



Pacific Drilling

11700 Katy Freeway / Suite 175

Houston / Texas / 77079

ph / +1 713334-6662

web / www.pacificdrilling.com

АКТ

про використання результатів дисертаційної роботи

Мар'янова Дениса Миколайовича

«Удосконалення системи зберігання та циркуляції бурильної суспензії на суднах типу PSV»

(спеціальність 271 – річковий та морський транспорт)

Цей акт складений 08.09.2020 р. у тому, що окремі технологічні розробки, які запропоновані у дисертаційному дослідженні «Удосконалення системи зберігання та циркуляції бурильної суспензії на суднах типу PSV» Мар'яновим Денисом Миколайовичем (а саме удосконалена система зберігання та циркуляції бурильної суспензії, що забезпечує додаткову примусову Х-подібну циркуляції бурильної суспензії) була використана на спеціалізованому морському судні "Pacific Mistral" типу PSV дедвейтом 4545 тонн, що сприяло:

- підтриманню реологічних характеристик бурильної суспензії під час її 56-ти годинного транспортування;
- 2,0...2,7-кратному підвищенню відносної продуктивності вантажних насосів (зі значень 33...48 до 88...98 %);
- більш ніж 2-кратному (з 7,3 до 3,6 годин) зниженню часу перекачування бурильної суспензії на нафтовидобувну платформу.

Master

Chief Engineer

Two handwritten signatures in blue ink are present. The top signature is more complex and stylized, while the bottom signature is simpler and more legible.

Darrel Jones

Alex Hazevoet

	Document Title	Management System Checklist			
	Chapter Title	Quarterly Condition Report			
	Document No.	OFFTEC 16			
	Revision Date	APR 2021	Revision No.	01	Page 1 of 1

АКТ

про використання результатів дисертаційної роботи

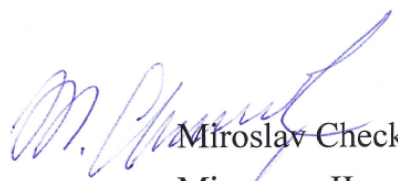
Мар'янова Дениса Миколайовича

«Удосконалення системи зберігання та циркуляції бурильної суспензії на суднах типу PSV»

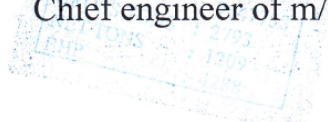
Цей акт складений у том, що розроблена Мар'яновим Денисом Миколайовичем удосконалена система зберігання та циркуляції бурильної суспензії при якій забезпечується додаткова Х-подібна циркуляції бурильної суспензії між нижньою частиною одного вантажного танка та верхньою частиною іншого, поруч розташованого з ним танку, та одночасна подача повітря в нижню частину цих танків, була впроваджена спеціалізованому морському судні типу PSV дедвейтом 4410 тонн. Використання запропонованої технології сприяло 1,9...2,7-кратному підвищенню відносної продуктивності вантажних насосів (зі значень 35...52 до 95...97 %), що забезпечують перекачування бурильної суспензії та 2,2-кратному (з 6,9 до 3,1 годин) зниженню часу перекачування бурильної суспензії на нафтовидобувну платформу.

Технологія удосконалення суднової системи зберігання та циркуляції бурильної суспензії, що запропонована Мар'яновим Д.М., була погоджена з технічним департаментом судноплавної компанії, яка виконує огляд та відповідає за спостереження за судном. Додаткові роботи, що пов'язані з удосконаленням суднової системи зберігання та циркуляції бурильної суспензії, були виконані безпосередньо судновим екіпажем під час стоянці судна.

Капітан т/х «Ben Nevis»
Master of m/v «Ben Nevis»
Старший механік т/х «Ben Nevis»
Chief engineer of m/v «Ben Nevis»


Miroslav Checkmadiev
Мірослав Чекмадієв

Volodymyr Kokorev
Володимир Кокорев





Pacific Drilling

11700 Katy Freeway / Suite 175

Houston / Texas / 77079

ph / +1 713334-6662

web / www.pacificdrilling.com

АКТ
про використання результатів дисертаційної роботи
Мар'янова Дениса Миколайовича
«Удосконалення системи зберігання та циркуляції бурильної суспензії на суднах типу PSV»

Цей акт складений 23.12.2021 р. у тому, що окремі технологічні розробки, які запропоновані у дисертаційному дослідженні **«Удосконалення системи зберігання та циркуляції бурильної суспензії на суднах типу PSV» Мар'яновим Денисом Миколайовичем** (а саме удосконалена система зберігання та циркуляції бурильної суспензії, що забезпечує комплексний вплив на бурильну суспензію та створює додаткову Х-подібну циркуляцію з одночасною подачею повітря в нижню частину вантажного танку та автоматичним регулюванням реологічних характеристик бурильної суспензії) була використана на спеціалізованому морському судні "Pacific Scirocco" типу PSV дедвейтом 5850 тонн, що сприяло 2,0...2,2-кратному підвищенню відносної продуктивності вантажних насосів (зі значень 42...48 до 91...95 %) та 2,4-кратному (з 7,3 до 3,1 годин) зниженню часу перекачування бурильної суспензії на нафтовидобувну платформу

Капітан т/х "Pacific Scirocco"

A handwritten signature in blue ink, appearing to be 'G. Anderson', written over a horizontal line.

Graham Anderson

Старший механік т/х "Pacific Scirocco"

A handwritten signature in blue ink, appearing to be 'P. Martinez', written over a horizontal line.

Paul Martinez

	Document Title	Management System Checklist			
	Chapter Title	Quarterly Condition Report			
	Document No.	OFFTEC 16			
	Revision Date	APR 2021	Revision No.	01	Page 1 of 1

АКТ

про використання результатів дисертаційної роботи

Мар'янова Дениса Миколайовича

«Удосконалення системи зберігання та циркуляції бурильної суспензії на суднах типу PSV»

Цей акт складений у том, що запропонований Мар'яновим Денисом Миколайовичем в дисертаційній роботі «Удосконалення системи зберігання та циркуляції бурильної суспензії на суднах типу PSV» спосіб оцінювання якості перебігу процесу транспортування бурильної суспензії, на підставі швидкості зміни її седиментаційної стійкості було впроваджено на спеціалізованому морському судні типу PSV дедвейтом 4630 тонн.

Це сприяло скороченню часу налагодження системи автоматичного регулювання реологічних характеристик бурильної суспензії з боку оператора.

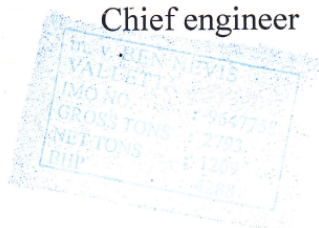
Технологія вимірювання та автоматичного регулювання реологічних характеристик була запропонована запропонований Мар'яновим Денисом Миколайовичем, також їм були виконано навчання суднової машинної команди щодо використання системи автоматичного регулювання реологічних характеристик бурильної суспензії під час її транспортування у вантажних танках судна.

Капітан

Christian Hogge

Chief engineer

Andriy Saptsov





INTERUNITY MANAGEMENT CORPORATION S.A.
69 Ethnikis Antistaseos Str., 15231 Athens, Greece

АКТ

щодо використання результатів дисертаційної роботи на здобуття
наукового ступеню доктора філософії
Мар'янова Дениса Миколайовича
**«Удосконалення системи зберігання та циркуляції бурильної суспензії
на суднах типу PSV»**

Цей акт засвідчує, що запропонована у дисертаційному дослідженні
«Удосконалення системи зберігання та циркуляції бурильної суспензії на
суднах типу PSV» **Мар'яновим Денисом Миколайовичем** система, що
забезпечує подачу повітря в нижню частину вантажного танку була
використана на м/в «Ariatosi», IMO № 9862891, порт приписки Valetta.

Вказана система забезпечила зниження розшарування важкого палива
(густиною 920...950 кг/м³, що призначено для використання в судновій
котельній установці) у витратних та відстійних цистернах. Це зменшило
утворення водяної фази у витратних та відстійних цистернах під час
тривалого або короткочасного зберігання палива, сприяло суцільності
потoku палива під час його транспортування від витратних цистерн до
паливних форсунок та забезпечило підвищення паливної економічності.

Капітан м/в «Ariatosi»

Старший механік м/в «Ariatosi»



Е. Кузьмин
11.01.2022

О. Куропятник
11.01.2022



УКРАЇНА

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ОДЕСЬКА МОРСЬКА АКАДЕМІЯ»

вул. Дідріхсона, 8, м. Одеса, 65029, тел.: (+38 048) 793-1672, факс: (+38 048) 793-1694
 www.onma.edu.ua e-mail: info@onma.edu.ua Код ЄДРПОУ 01127799



ЗАТВЕРДЖУЮ

Перший проректор

Національного університету

«Одеська морська академія»

д-р юрид. наук, професор

Шемякін О. М.

_____ 2022 р.

АКТ

про використання результатів дисертаційної роботи

Мар'янова Дениса Миколайовича

**на тему «Удосконалення системи зберігання та циркуляції бурильної суспензії
 на суднах типу PSV»**

в освітньому процесі Національного університету «Одеська морська академія»

Ми, що нижче підписались, начальник навчального відділу Національного університету «Одеська морська академія» Пархоменко М.М., директор навчально-наукового інституту автоматики та електромеханіки, д-р техн., наук, професор Будашко В.В., директор навчально-наукового інституту інженерії, к-т техн., наук, професор Колегаєв М.О. склали цей акт у тому, що результати дисертаційної роботи Мар'янова Дениса Миколайовича на тему «Удосконалення системи зберігання та циркуляції бурильної суспензії на суднах типу PSV» впроваджені в освітній процес навчально-наукового інституту автоматики та електромеханіки та навчально-наукового інституту інженерії, а саме:

1) в дисципліну «Безпечне управління та менеджмент ресурсів машинного відділення», яку викладають курсантам 4-го курсу навчально-наукового інституту автоматики та електромеханіки (рівень бакалавр);

2) в дисципліну «Автоматизація технологічних процесів та виробництв», яку викладають курсантам 4-го курсу навчально-наукового інституту автоматики та електромеханіки (рівень бакалавр);

3) в дисципліну «Процеси перетворення енергії суднових силових установок», яку викладають курсантам 1-го курсу навчально-наукового інституту інженерії (рівень магістр).

Начальник навчального відділу

Микола ПАРХОМЕНКО

Директор навчально-наукового інституту автоматики та
 електромеханіки, д-р техн., наук, професор

Віталій БУДАШКО

Директор навчально-наукового інституту інженерії,
 к-т техн., наук, професор

Михайло КОЛЕГАЄВ

