Экспериментальное исследование ключевых факторов стабильности наножидкости на основе трансформаторного масла

С. М. Коробейников[a], Д. С. Ведерников[a], В. Е. Шевченко[a,*], А. В. Ридель[a], Т. Е. Кусков[b]

[a]Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск, 630073, Россия
[b]Институт химии твердого тела и механохимии Сибирского отделения Российской академии наук, г. Новосибирск, 630128, Россия
[*]e-mail: shevchenko_v24110@mail.ru

Поступила в редакцию 25.02.2026
После доработки 13.04.2026
Принята к публикации 14.04.2026

Описаны исследования стабильности наножидкостей на основе трансформаторного масла с добавлением частиц диоксида титана. Экспериментально определены оптимальная мощность ультразвукового диспергатора и концентрация поверхностно-активных веществ. Проведен сравнительный анализ седиментационной устойчивости суспензий на основе свежего и отработанного трансформаторного масла. Выявлен эффект повышенной стабильности наночастиц в отработанном масле даже без использования стабилизирующих добавок. Предложено теоретическое обоснование данного феномена, связывающее устойчивость дисперсии с изменением показателя кислотности дисперсионной среды и смещением состояния системы относительно изоэлектрической точки наночастиц.

Ключевые слова: трансформаторное масло, стабильность, адсорбция, наножидкость, поверхностно-активные вещества, дзета-потенциал

УДК 621.315.61, 544.77, 677.042.22
https://doi.org/10.52577/eom.2026.62.2.70

ВВЕДЕНИЕ

Современная электроэнергетика требует постоянного совершенствования систем изоляции и охлаждения для предотвращения аварийных ситуаций при работе с высоковольтным оборудованием. В связи с этим активно исследуется методика усовершенствования жидкой изоляции путем приготовления наножидкостей. Экспериментально подтверждено, что добавление наночастиц увеличивает теплопроводность и электрическую прочность исходной жидкости [1–7].

Поскольку в высоковольтном оборудовании в качестве изолирующей и охлаждающей среды преимущественно используется минеральное масло, оно является наиболее перспективной основой для такой модификации. Исследования показывают, что присутствие наночастиц в масле не только улучшает его изначальные характеристики, но и снижает негативное влияние влаги, продлевая срок службы изоляции [8–10].

Однако, несмотря на очевидные преимущества, широкому внедрению технологии препятствует проблема поддержания стабильности системы частиц в жидкости. Главной причиной дестабилизации и дальнейшей потери улучшенных свойств является агломерация частиц под действием сил межмолекулярного притяжения Ван-дер-Ваальса. Из-за огромной удельной поверхности наночастиц эти силы становятся значительными, заставляя частицы агломерировать. За счет агломерации средний размер и масса частиц в системе увеличиваются, что усиливает действие сил гравитации, ускоряющих процесс выпадения агломератов в осадок, и ведет к общему ухудшению модифицируемых характеристик [11].

Для предотвращения этого процесса необходимо создать компенсирующие силы отталкивания. Это достигается двумя основными механизмами стабилизации – электростатическим и пространственным. Электростатическая стабилизация осуществляется за счет формирования двойного электрического слоя вокруг частиц в ходе адсорбции свободных ионов жидкости. Одноименно заряженные ионные облака вокруг частиц отталкиваются друг от друга, таким образом препятствуя слипанию частиц. Мерой этого отталкивания является дзета-потенциал, определяющий силы отталкивания. Значения дзета-потенциала выше ±30 мВ обычно указывают на хорошую стабильность системы.

В то же время пространственная стабилизация может создаваться путем адсорбции на поверхности частиц молекул поверхностно-активных веществ (ПАВ), которые образуют барьер, механически препятствующий сближению частиц.



Рис. 1. Схематическое изображение установки фильтрации масла (*1* – колба Бунзена; *2* – воронка Бюхнера; *3* – вакуумный насос Vacuumbrand MZ 2 NT).

Преимущественно именно ПАВ используются при стабилизации коллоидных систем [12–14].

Кроме эффекта, оказываемого добавлением ПАВ, на стабильность системы могут повлиять свойства применяемых материалов и выбранная методика приготовления наножидкости [15–17]. Цель данной работы – найти способ приготовления стабильной наножидкости на основе трансформаторного масла с частицами TiO_2 и определить критические параметры процесса приготовления, влияющие на итоговую характеристику.

МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ

В качестве дисперсной фазы были выбраны наночастицы диоксида титана со средним размером 49 нм. Выбор был обусловлен значительным объемом литературных данных, подтверждающих их эффективность для улучшения свойств исходной жидкости. Для стабилизации наножидкости использовались следующие ПАВ: олеиновая кислота, додецилсульфат натрия (ДСН) и Тритон-Х.

Дисперсионной средой послужили два вида трансформаторного масла марки ГК: свежее и отработанное. Перед использованием свежее масло подвергалось предварительной очистке для удаления механических примесей и влаги. Очистка проводилась с использованием фильтрационной установки, представленной на рис. 1. В качестве фильтрующего элемента использовался фильтр «синяя лента» с размером пор 2–3 мкм, а для осушения применялся силикагель марки KSKG. Отработанное масло дополнительной обработке не подвергалось с целью сохранения в объеме продуктов старения масла.

Непосредственное приготовление наножидкостей осуществлялось двухступенчатым методом по следующему алгоритму:

1) подготовка требуемых концентраций диоксида титана с применением химических весов Analytical Balance ME204/A;

2) добавление поверхностно-активного вещества в масло и гомогенизация жидкости путем перемешивания магнитной мешалкой в течение 10 минут;

3) добавление частиц диоксида титана в масло. Ультразвуковое диспергирование при помощи аппарата ВОЛНА-М и одновременное перемешивание магнитной мешалкой в течение 90 минут в специализированной ячейке, охлаждаемой водой по контуру. Мощность ультразвукового диспергатора – 1 кВт.

Стоит отметить, что в процессе диспергирования масло сильно перегревается, достигая значений температуры более 150 ºС. Для предотвращения чрезмерного нагрева наножидкости была разработана система охлаждения. Колба с маслом помещалась в закрытую ячейку из оргстекла с подачей в нее проточной холодной воды на протяжении всего времени ультразвукового воздействия. Используя разработанную систему, среднюю температуру масла удалось снизить до 70 ºС.

Для оценки стабильности наножидкости был использован метод оптической регистрации. Суть метода заключается в том, что прибор пропускает луч света через масло и измеряет, сколько света прошло насквозь. Если в масле есть наночастицы, они задерживают прохождение света – чем их больше в растворе, тем он, соответственно, мутнее и светопропускаемость меньше. Чем меньше светопропускаемость спустя время, тем больше наночастиц находится во взвешенном состоянии в объеме масла. В качестве измерительной установки использовался фотоколориметр КФК-2. Приготовленный образец наножидкости разливался в два химических цилиндра объемом 250 мл, аналогичных цилиндрам, представленным на рис. 2.

Для унификации отбора проб для замеров был использован стеклянный шприц, с помощью которого производился отбор проб на глубине ~ 5 см. Для пробы, отобранной из одного цилиндра, производилось два измерения. Таким образом, для каждого образца наножидкости осуществлялось четыре измерения, которые в дальнейшем были приведены к среднему



Рис. 2. Пробы наномасла, разлитые по мерным цилиндрам для визуального наблюдения процесса агломерации.

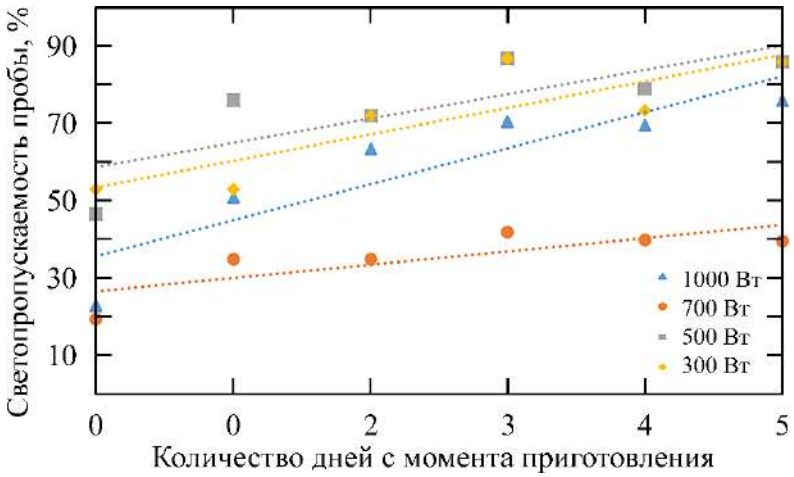


Рис. 3. Динамика стабильности наножидкости в зависимости от разной мощности диспергирования.

значению. Достижение значения светопропускаемости ≥70% в ходе измерений означало, что большая часть наночастиц агломерировалась и выпала в осадок. В другом случае длительное сохранение уровня светопропускаемости, измеренного сразу после приготовления, будет свидетельствовать о долгосрочной стабильности наносистемы. Наблюдения в ходе эксперимента проводились на протяжении пяти суток с интервалами измерения в 24 часа.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

В ходе первой серии экспериментов исследовалось влияние мощности ультразвукового воздействия на стабильность суспензии. Наножидкости готовились при значениях мощности диспергатора 30, 50, 70 и 100% от номинального значения в 1 кВт. В качестве контрольного ПАВ использовался Тритон-Х в весовой концентрации 1:3, подобранной на основе литературных данных [18]. Динамика изменения средних значений светопропускаемости образцов в течение пяти суток представлена на рис. 3.

Измерения показали, что наименьшее изменение светопропускаемости, свидетельствующее о более стабильной пробе, достигается при мощности, равной 70% от номинальной. При мощности в 700 Вт осаждение протекает медленнее в сравнении с остальными пробами в условиях данного эксперимента.

Во второй серии опытов при определенной оптимальной мощности эмпирически производился подбор вида и концентрации поверхностно-активных веществ. Были исследованы такие ПАВ, как Тритон-Х (диапазон весовых концентраций от 1:1 до 1:16), олеиновая кислота (диапазон концентраций от 1:1 до 1:20) и додецилсульфат натрия (диапазон весовых концентраций от 1:0,25 до 1:2). Результаты измерений средних значений светопропускаемости для наиболее успешных образцов отображены на рис. 4.

В ходе анализа результатов было установлено, что пробы с ДСН демонстрируют сравнительно меньшую стабильность, а при высоких концентрациях наблюдается выпадение осадка в виде белых перьевидных образований. В свою очередь, наилучшую устойчивость к седиментации продемонстрировала проба с олеиновой кислотой. Общим выводом данной серии измерений является то, что, несмотря на добавление ПАВ, во всех пробах на основе свежего масла наблюдается устойчивый тренд на увеличение светопропускаемости, что говорит о постепенной агломерации частиц. Стоит отметить, что повторно стабильности наножидкости с использованием Тритон-Х, наблюдаемой на рис. 3, достичь не удалось.

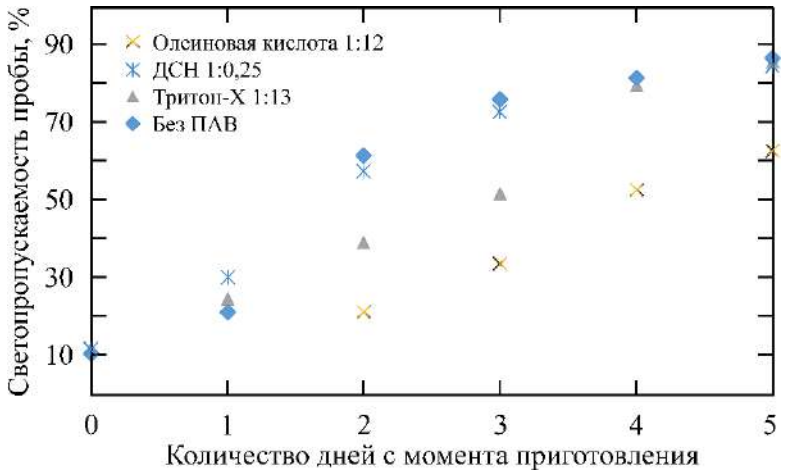


Рис. 4. Динамика стабильности наножидкостей с подобранными концентрациями ПАВ.

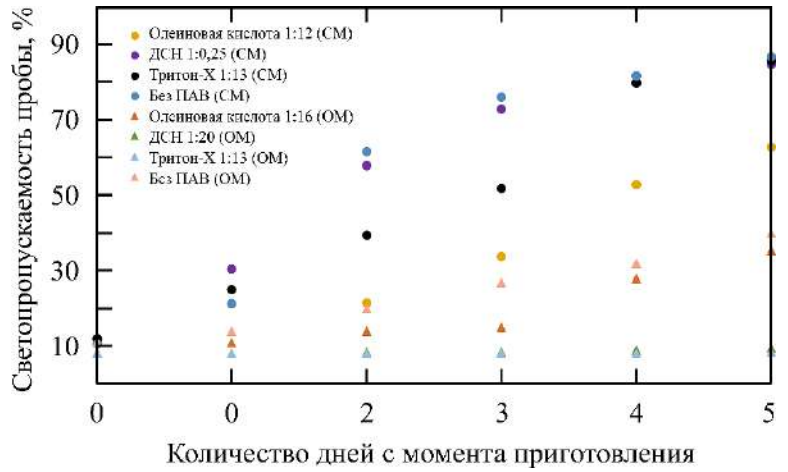


Рис. 5. Сравнение динамики стабильности проб на основе свежего масла (СМ) и отработанного масла (ОМ). Уровни светопропускаемости проб на основе отработанного масла с ДСН и Тритоном-Х находятся приблизительно на одном уровне.

Третья серия экспериментов была посвящена сравнительному анализу стабильности наножидкостей на основе свежего и отработанного трансформаторного масла. Так как среда масла с примесями значительно отличается от чистого масла, оптимальные концентрации применяемых ПАВ определялись эмпирически, по аналогии с предыдущей серией измерений, в диапазоне весовых соотношений от 1:1 до 1:20. После приготовления стабильность проб также проверялась с помощью спектрофотометра и сравнивалась с результатами предыдущих измерений. Результаты сравнения представлены на рис. 5.

Экспериментальные данные показали, что образцы на основе отработанного масла демонстрируют сравнительно большую седиментационную устойчивость. Даже без добавления ПАВ наножидкость на основе отработанного масла сохраняла низкий уровень светопропускаемости, превосходя стабилизированные образцы на свежем масле. в ходе последующего наблюдения на протяжении 30 суток.

Дополнительные измерения дзета-потенциала и размера частиц методом динамического рассеяния света с использованием анализатора Photocor Compact-Z выявили рост среднего размера частиц с 50 до 100 нм для проб на свежем масле уже в течение первого часа после приготовления. Прибор не смог зафиксировать устойчивое значение дзета-потенциала, что указывает на его нахождение в околонулевой зоне. Аналогичные измерения для отработанного масла провести не удалось из-за высокой оптической плотности стабильной суспензии, препятствующей прохождению луча лазера.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Анализ полученных данных позволяет выявить ключевые факторы, определяющие стабильность исследуемых наножидкостей, и предложить механизм, объясняющий аномально высокую устойчивость суспензий на основе отработанного масла.

Первым значимым параметром является мощность диспергации. Наблюдаемый оптимум мощности объясняется балансом между необходимостью разрушения агломератов и предотвращением деградации среды. При недостаточной

мощности энергии ультразвука не хватает для преодоления сил Ван-дер-Ваальса и эффективного разделения слипшихся наночастиц. В то же время избыточная мощность приводит к локальным перегревам жидкости из-за эффекта кавитации. Локальное повышение температуры вызывает, во-первых, снижение вязкости масла, что, согласно закону Стокса, увеличивает скорость осаждения, а во-вторых, может приводить к термическому разрушению молекул ПАВ, что препятствует формированию защитного слоя вещества на поверхности частиц.

Выбор типа ПАВ также оказался важным фактором для свежего масла. Низкая эффективность додецилсульфата натрия обусловлена его плохой растворимостью в трансформаторном масле, что закономерно приводит к его кристаллизации и выпадению в осадок, который, вероятно, увлекает за собой и наночастицы. Олеиновая кислота, напротив, показывает наилучший результат благодаря своему строению: длинная углеводородная цепь хорошо совместима с маслом и способна сформировать на границе частиц защитный слой, обеспечивающий физическое отталкивание. Однако даже пространственная стабилизация в чистом масле оказалась недостаточно эффективной для долгосрочного удержания частиц.

Наиболее значимым результатом работы является обнаружение эффекта стабилизации системы наночастиц диоксида титана в отработанном масле. Это явление можно попытаться объяснить через теорию двойного электрического слоя и понятие изоэлектрической точки. Поверхностный заряд частиц оксидов металлов в жидкости напрямую зависит от водородного показателя (pH) среды. Существует определенное значение pH, при котором суммарный заряд поверхности частицы равен нулю – изоэлектрическая точка.

Для диоксида титана изоэлектрическая точка находится в области нейтрального pH ≈ 6,0−7,5. Чистое трансформаторное масло, в свою очередь, является практически нейтральной средой. Следовательно, попадая в свежее масло, частицы TiO_2 оказываются в условиях, близких к их изоэлектрической точке. В этом состоянии дзета-потенциал частиц стремится к нулю, исчезает кулоновский барьер отталкивания и единственными действующими силами остаются силы притяжения Ван-дер-Ваальса. Это подтверждается данными дополнительных измерений: невозможность измерения дзета-потенциала и зафиксированное удвоение размера частиц в течение часа говорят о стремительной коагуляции [19].

Отработанное же масло в процессе эксплуатации подвергается окислению, в результате чего в нем накапливаются кислые продукты распада, смещающие нейтральную среду в кислую область с pH ≈ 4−5. Это смещение выводит систему из состояния равновесия изоэлектрической точки. В кислой среде поверхность частиц TiO_2 протонируется, приобретая значительный положительный заряд [20, 21].

Возникновение заряда на поверхности частиц приводит к формированию мощного двойного электрического слоя. Высокое значение поверхностного заряда обеспечивает, соответственно, высокий дзета-потенциал. В свою очередь, это создает силы электростатического отталкивания, превосходящие силы межмолекулярного притяжения. Именно возникшим электростатическим отталкиванием можно объяснить сравнительно замедленное протекание агломерации в отработанном масле даже без добавления ПАВ. Продукты старения масла, обычно считающиеся вредными примесями, в данном случае выступают в роли естественных стабилизаторов наномасла.

Невозможность измерения дзета-потенциала в свежем масле также косвенно подтверждает эту теорию: прибор не мог зафиксировать устойчивый сигнал именно из-за близости потенциала к нулю и хаотичного движения слабозаряженных частиц. Дальнейшим же развитием данного исследования может быть перспектива возможности искусственного регулирования pH чистого масла для достижения стабильности без затратного по времени подбора вида и концентрации ПАВ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе работы была исследована методика приготовления наножидкостей на основе трансформаторного масла и частиц TiO_2, а также определены критические параметры, влияющие на их стабильность.

Во-первых, установлено, что оптимальная гомогенизация в условиях эксперимента достигается при мощности ультразвукового излучения ≈ 700 Вт. Отклонение от этого значения в меньшую сторону не позволяет разбить агломераты, а в большую – ведет к локальным перегревам и деструкции ПАВ.

Во-вторых, сравнительный анализ эффекта от применения стабилизирующих добавок показал, что в свежем масле наилучшую устойчивость обеспечивают пробы с олеиновой кислотой. Тем не менее даже с использованием ПАВ во всех пробах на основе свежего масла наблюдается протекание процесса агломерации.

Ключевым результатом работы стало обнаружение того факта, что наножидкости на основе отработанного масла обладают сравнительно лучшей устойчивостью к осаждению даже без стабилизирующих добавок. Данный эффект можно объяснить смещением pH среды в кислую область за счет присутствия в объеме продуктов старения масла. Это удаляет систему от изоэлектрической точки TiO_2, способствуя росту поверхностного заряда частиц и дзета-потенциала, что вызывает электростатическое отталкивание между заряженными частицами и препятствует агломерации.

Опираясь на выявленную зависимость устойчивости наносистемы от кислотности среды, дальнейшие исследования будут направлены на поиск и изучение методов искусственного регулирования pH в чистом масле. В дальнейшем это позволит достичь высокой стабильности наножидкостей без ухудшения их свойств.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Исследование выполнено при финансовой поддержке РНФ в рамках гранта № 22-79-10198-П (https://rscf.ru/project/22-79-10198-П/).

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Choi, S.U.S., Singer, D.A., and Wang, H.P., Developments and applications of non-Newtonian flow, *ASME FED*, 1995, vol. 231, c. 99.

2. Yu, W., France, D.M., Choi, S.U.S., and Routbort, J.L. *Review and assessment of nanofluid technology for transportation and other applications*, Energy Systems Division, Argonne National Laboratory, 2007, 75 p.

doi: 10.2172/919327.

3. Mirahmad, A., Shankar Kumar, R., Pato Doldán, B., Prieto Rios, C., et al., Beyond thermal conductivity: a review of nanofluids for enhanced energy storage and heat transfer, *Nanomaterials*, 2025, vol. 15, no. 4, p. 302.

https://doi.org/10.3390/nano15040302

4. Shafiq, A., Iqbal, M. A., Sindhu, T. N., Iqbal, H., et al., Synthesis, thermophysical behavior, and environmental implications of nanofluids: A comprehensive review, *Results in Engineering*, 2025, vol. 28, art. ID 107763.

https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.107763

5. Li, Y., Chen, J., Shi, S., Kang, Q., et al., Sustainable insulating materials for power systems, *Nature Reviews Electrical Engineering*, 2026, p. 1.

6. Adekunle, A.A., Oparanti, S.O., and Fofana, I., Performance assessment of cellulose paper impregnated in nanofluid for power transformer insulation application: A review, *Energies*, 2023, vol. 16, no. 4, art. ID 2002.

https://doi.org/10.3390/en1604200

7. Huang, M., Li, S., Zhang, L., Yao, Y., et al., Improvement of breakdown and flashover properties against thermal aging of oil paper insulation through addition of TiO2 nanoparticles, *IET Generation, Transmission & Distribution*, 2023, vol. 17, no. 4, p. 821.

https://doi.org/10.1049/gtd2.12709

8. Sorte, S., Salgado, A., Monteiro, A. F., Ventura, D., et al., Advancing power transformer cooling: the role of fluids and nanofluids – a comprehensive review, *Materials*, 2025, vol. 18, no. 5, art. ID 923.

9. Коробейников, С.М., Шевченко, В.Е., Ломан, В.А., Ридель, А.В., О влиянии частиц на электропроводность жидких диэлектриков, *Электронная обработка материалов*, 2023, т. 59, № 5, с. 37.

10. Rafiq, M., Lv, Y., and Li, C., A review on properties, opportunities, and challenges of transformer oil-based nanofluids, *Journal of Nanomaterials*, 2016, vol. 2016, no. 1, art. ID 8371560.

https://doi.org/10.1155/2016/8371560

11. Farade, R. A., Wahab, N. I. A., Mansour, D. E. A., Rafiq, M., et al., Dielectric Nanofluids for Transformers: A Review on Stability, Dielectric, Thermophysical, and Chemical Properties, *IEEE Access*, 2025, vol. 13, p. 142467.

12. Kalakonda, S.P., and Ghassemi, M., Nanodielectric fluids for power transformer insulation and cooling: A review identifying challenges and future research needs, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2024, vol. 31, № 2, p. 696.

13. Жакин, А.И., Кузько, А.Е., Кузьменко, А.П., Тан, М.М., Исследование электропроводности магнитных жидкостей, *Электронная обработка материалов,* 2022, т. 58, № 1, с. 41.

https://doi.org/10.52577/eom.2022.58.1.41

14. Oparanti, S. O., Fofana, I., Jafari, R., Brahami, Y., et al., Enhanced stability nanofluids for sustainable high-voltage transformer applications, *Journal of Molecular Liquids*, 2025, vol. 438, art. ID 128692.

15. Korobeynikov, S.M., Ridel, A.V., Shevchenko, V.E., Bychkov, A.L., et al., Study of Nano-oil Preparation Conditions for Experiments to Determine Electrical Strength, *2024 IEEE 25th International Conference of Young Professionals in Electron Devices and Materials (EDM)*, 2024, p. 1350.

16. Dey, D., Kumar, P., and Samantaray, S., A review of nanofluid preparation, stability, and thermo-physical properties, *Heat Transfer—Asian Research*, 2017, vol. 46, no. 8, p. 1413.

https://doi.org/10.1002/htj.21282

17. Korobeynikov, S.M., Ridel, A.V., Shevchenko, V.E., Bychkov, A.L., et al., Electrophysical properties of nanooil under different preparation conditions, *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2025, vol. 61, no. 2, p. 2728.

18. Dhanola, A., and Garg, H.C., Influence of different surfactants on the stability and varying concentrations of TiO2 nanoparticles on the rheological properties of canola oil-based nanolubricants, *Applied Nanoscience*, 2020, vol. 10, no. 9, p. 3617.
19. Zhang, H., Qing, S., Zhai, Y., Zhang, X., et al., The changes induced by pH in TiO2/water nanofluids: Stability, thermophysical properties and thermal performance, *Powder Technology*, 2021, vol. 377, p. 748.
20. Umar, S., Sulaiman, F., Abdullah, N., and Mohamad, S.N., Investigation of the effect of pH adjustment on the stability of nanofluid, *AIP Conference Proceedings*, 2018, vol. 2031, no. 1, art. ID 020031.
21. Ali, N., Teixeira, J.A., and Addali, A., A review on nanofluids: fabrication, stability, and thermophysical properties, *Journal of Nanomaterials*, 2018, vol. 2018, art. ID 6978130. https://doi.org/10.1155/2018/6978130

Summary

In this paper, the studies of the stability of nanofluids based on the transformer oil with the addition of titanium dioxide particles are described. Experimental procedures were established to determine the optimal ultrasonic dispersion power and surfactant concentrations. The sedimentation stability of the suspensions formulated with fresh versus service-aged transformer oil was compared. It was found that the nanoparticles exhibited an enhanced stability in the service-aged oil even in the absence of stabilizing agents. A theoretical explanation is proposed, attributing that phenomenon to the variation in the dispersion medium acidity and the displacement of the system relative to the nanoparticles isoelectric point.

Keywords: transformer oil, stability, adsorption, nanofluid, surfactants, zeta-potential