

<https://doi.org/10.52676/1729-7885-2024-2-135-140>

УДК 535.243

ИССЛЕДОВАНИЕ СТАБИЛЬНОСТИ НАНОЖИДКОСТЕЙ НА ОСНОВЕ TiO_2 ДЛЯ ПОТЕНЦИАЛЬНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В ГИБРИДНЫХ СОЛНЕЧНЫХ КОЛЛЕКТОРАХ

А. Ж. Адылканова, А. Б. Касымов*, А. А. Бектемисов, О. А. Степанова, М. В. Ермоленко

НАО «Университет имени Шакарима города Семей», Семей, Казахстан

*E-mail для контактов: festland2@yandex.kz

Исследование наножидкостей в системе отвода тепла в гибридных солнечных коллекторах является актуальной задачей интенсификации теплообмена. Данный теплоноситель позволяет производить более эффективное охлаждение поверхности солнечной панели, что увеличивает производительность коллектора. Однако, низкая стабильность наножидкости, проявляющаяся в агломерации наночастиц и последующем их осаждении, сказывается на ухудшении теплофизических свойств. В данной статье рассмотрен процесс осаждения наножидкости TiO_2 -бидистиллированная вода, стабилизированной поверхностно-активными веществами (сурфактантами) СТАВ и SDBS. Процесс осаждения контролировался УФ-вид спектроскопией. Высокий стабилизирующий эффект наблюдался при применении сурфактанта СТАВ, выраженный в низкой скорости оседания по сравнению с использованием SDBS.

Ключевые слова: гибридные солнечные коллекторы, стабильность, наножидкость, поверхностно-активные вещества, УФ-вид спектроскопия.

ВВЕДЕНИЕ

Одной из основных экологических проблем современной энергетики является увеличение количества парниковых газов [1]. По данным [2] на долю сжигания топлива приходится до 90% выбросов CO_2 . Ввиду этого, уменьшение выбросов парниковых газов предполагает разработку новых энергоэффективных, безотходных технологий. Солнечная энергетика является перспективным решением в области экологической политики энергогенерации [3, 4]. Существенный рост мощностей солнечной энергетики играет важную роль в обеспечении устойчивого развития общества [5]. Однако существует ряд проблем, возникающих при эксплуатации солнечных модулей: низкая эффективность преобразования солнечной энергии в электрическую [6], снижение эффективности при росте температуры поверхности панели [7]. Проблема низкой эффективности солнечных панелей решается путем их охлаждения в гибридных солнечных коллекторах, производящих таким образом как электрическую, так и тепловую энергию [8–13].

В последние годы широкий интерес представляет использование наножидкости в гибридных солнечных коллекторах ввиду более высокой теплопроводности получаемого охладителя и, как следствие, решение проблемы нагрева солнечной панели [14–19]. Наножидкость представляет собой коллоидную систему, состоящую из базовой жидкости и находящихся в ней наночастиц размером до 100 нм. Ранее исследовательской группой были опубликованы данные по изучению теплофизических свойств наножидкостей на основе TiO_2 [20]. На данный момент приготовление наножидкости осуществляется двумя методами: одноэтапным и двухэтапным. Двухэтапный метод экономически более целесообразен ввиду использования наночастиц в промышленном масштабе

по сравнению с одноэтапным [21]. Однако получаемая двухэтапным методом наножидкость обладает низкой стабильностью ввиду присутствия промежуточных процессов, связанных с хранением, транспортировкой, сушкой и диспергированием [22]. Устойчивое состояние наножидкости является ключевым фактором не только в проведении полноценных исследований [23], но и обуславливает высокие показатели теплопроводности [24, 25].

Исследование применения наночастиц TiO_2 в различных отраслях промышленности стало доступным ввиду низкой стоимости, механической и химической стабильности, гидрофильности [26–28]. Особое внимание уделяется потенциальному использованию TiO_2 -наножидкости в качестве теплоносителя для гибридных солнечных коллекторов [29–34]. Однако, при двухэтапном методе приготовления стабильность TiO_2 -наножидкости довольно низкая. Теория Дерягина, Ландау, Фервея, Овербека (ДЛФО) определяет состояние дисперсной системы ($U_{\text{полн}}$) как сумму энергии электростатического отталкивания ($U_{\text{от}}$) частиц и энергии потенциального взаимодействия ($U_{\text{пр}}$) [35]:

$$U_{\text{полн}} = U_{\text{от}} + U_{\text{пр}}, \quad (1)$$

$$U_{\text{от}} = \frac{2\epsilon\epsilon_0\phi_\delta^2}{\lambda} e^{-\frac{h}{\lambda}}, \quad (2)$$

где ϵ – диэлектрическая проницаемость среды между взаимодействующими частицами, Ф/м; ϵ_0 – диэлектрическая проницаемость вакуума, Ф/м; ϕ_δ – потенциал на границе раздела адсорбционного и диффузного слоев противоионов, мВ; h – расстояние между частицами, нм; λ – толщина диффузного слоя противоионов, нм.

$$U_{np} = -\frac{A^*}{12\pi h^2}, \quad (3)$$

где A^* – константа молекулярных сил Гамакера; h – расстояние между частицами дисперсной фазы, нм.

Стабильность наножидкости проявляется в исключении образования кластеров и агломерации, то есть в превалировании сил электростатического отталкивания, и как следствие уменьшении седиментации. Увеличить силу электростатического отталкивания на данный момент можно следующими распространенными способами: изменением pH жидкости, добавлением поверхностно-активных веществ (электростатическая стабилизация). Электростатическая стабилизация является на данный момент распространенным методом создания стабильной наножидкости [36,37], однако с определенными ограничениями к температуре жидкости [38].

Количественно процесс оседания различных режимов ультразвуковой обработки можно выявить с помощью УФ-вид спектрофотометрии. В УФ-вид спектрофотометре при пропускании света через жидкость, ввиду содержания частиц во взвешенном состоянии, часть света поглощается. Плотность поглощения соответствует концентрации частиц в жидкости. Калибровочная кривая, представляющая собой зависимость спектра поглощения от концентрации частиц, позволяет определять осаждение частиц с течением времени. Для этого через некоторое время требуется «просветить» образец и по значению плотности абсорбции на калибровочном графике данной наножидкости найти концентрацию. Данная методика применялась авторами [39–42]. Согласно [43] спектр длин волн поглощения для наночастиц TiO_2 лежит в пределах 280–400 нм.

В данной статье будет рассмотрено влияние добавления сурфактантов SDBS, CTAB и ультразвуковой обработки на стабильность наножидкости TiO_2 -бидистиллированная вода при помощи УФ-вид спектрофотометрии. Выбор данных сурфактантов обусловлен спецификой их строения (углеводородный «хвост») и определения насколько сильно влияние данного фактора на стабильность наножидкости.

МЕТОДЫ

Наночастицы TiO_2 представлены фирмой «Sigma-Aldrich». В заявленных паспортных данных размер наночастиц не превышает 50 нм. Количественный анализ наночастиц TiO_2 проводили с помощью энергодисперсионного спектрометра «INCA Energy 250» сканирующего электронного микроскопа Jeol JSM-6390LV. Гомогенизация наножидкости производилась ультразвуковым диспергатором модели «JY92-PIDN» фирмы Scientz, мощность 900 Вт, частота ультразвука 20 кГц. Процесс оседания контролировали с помощью двухлучевого УФ-вид спектрофотометра BK-D590 фирмы Biobase.

Приготовление наножидкости осуществлялось двухэтапным методом. Базовая жидкость – биди-

стиллированная вода. Массовая концентрация наночастиц составляет 0,03%. Экспериментальным путем выявлена концентрация поверхностно-активных веществ CTAB и SDBS, благоприятствующая более стабильному состоянию. Соотношение TiO_2 /CTAB и TiO_2 /SDBS составляет 1:0,5. Продолжительность диспергирования наночастиц была определена в 30 мин. Измерения проводились при температуре 25 °C в течение 10 дней. Данные условия эксперимента являются достаточными для определения качественных изменений в процессе оседания наножидкостей.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Элементный анализ наночастиц TiO_2 изображен на рисунке 1. Качество полученных порошков подтверждается.

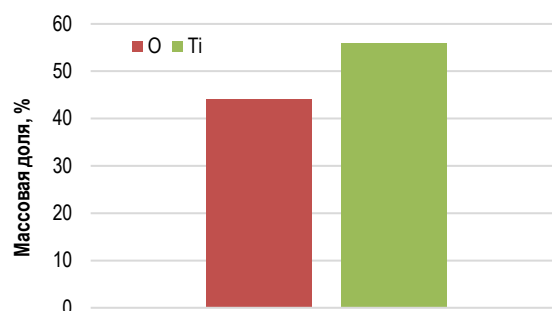


Рисунок 1. Элементный анализ наночастиц TiO_2

Для определения скорости оседания в контексте массовых концентраций использовались калибровочные кривые, построенные для различных концентраций TiO_2 /CTAB (рисунок 2) и TiO_2 /SDBS (рисунок 3). Калибровочная кривая представляет собой зависимость спектра поглощения от массовых концентраций веществ, находящихся во взвешенном состоянии. Высокое значение коэффициента детерминации (R^2) для наножидкости TiO_2 /SDBS = 0,999 и для TiO_2 /CTAB = 0,982 подтверждает линейную зависимость.

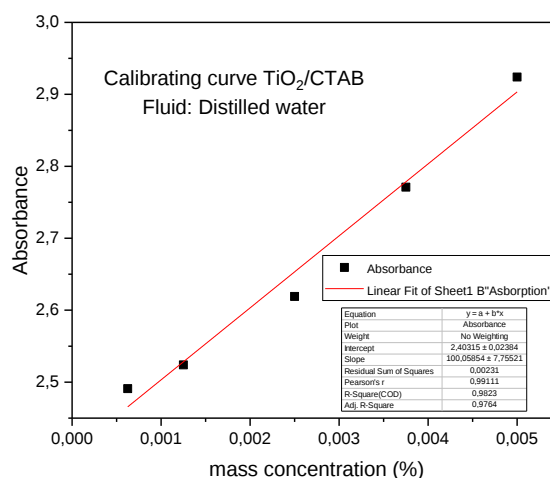


Рисунок 2. Калибровочная кривая для TiO_2 /CTAB наножидкости

**ИССЛЕДОВАНИЕ СТАБИЛЬНОСТИ НАНОЖИДКОСТЕЙ НА ОСНОВЕ TiO_2
ДЛЯ ПОТЕНЦИАЛЬНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В ГИБРИДНЫХ СОЛНЕЧНЫХ КОЛЛЕКТОРАХ**

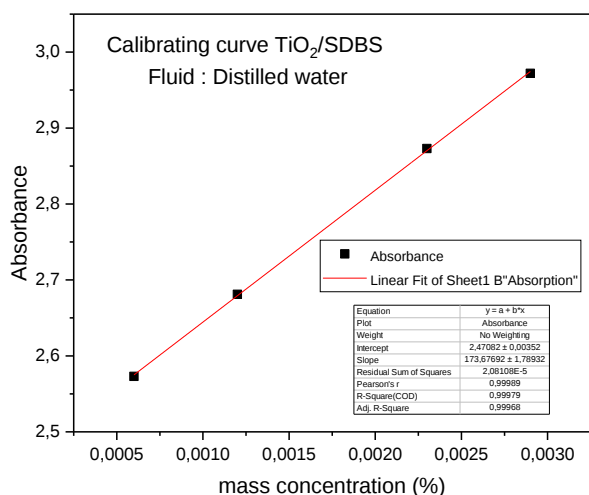


Рисунок 3. Калибровочная кривая для TiO_2/SDBS наножидкости

Спектры поглощений для данных наножидкостей, использованные для построения калибровочных кривых, представлены на рисунках 4 и 5.

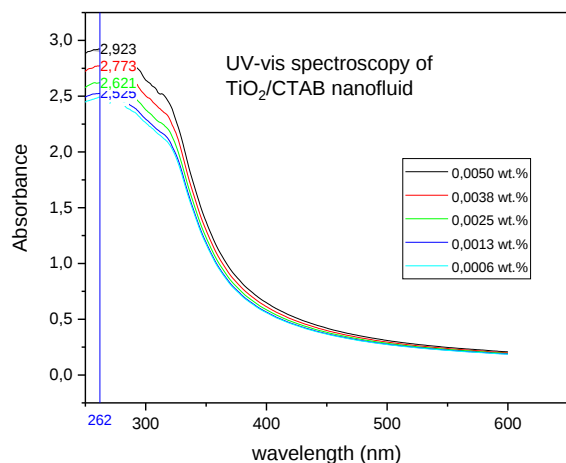


Рисунок 4. Спектры поглощения TiO_2/CTAB наножидкости при приготовлении калибровочного раствора

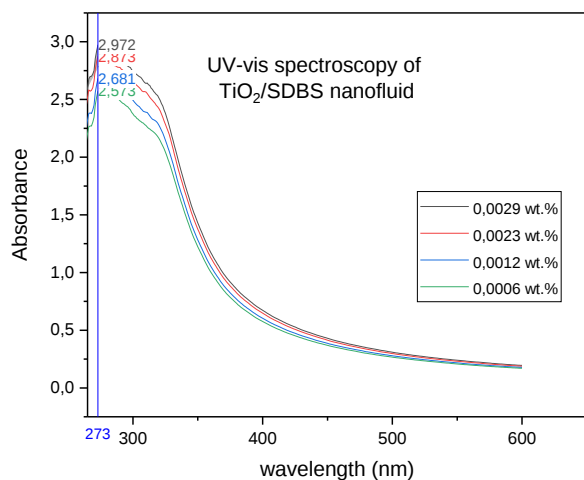


Рисунок 5. Спектры поглощения TiO_2/SDBS наножидкости при приготовлении калибровочного раствора

Результаты исследования процесса осаждения при помощи УФ-вид спектrophотометрии наножидкостей TiO_2/CTAB -бидистиллированная вода и TiO_2/SDBS -бидистиллированная вода представлены на рисунках 6, 7.

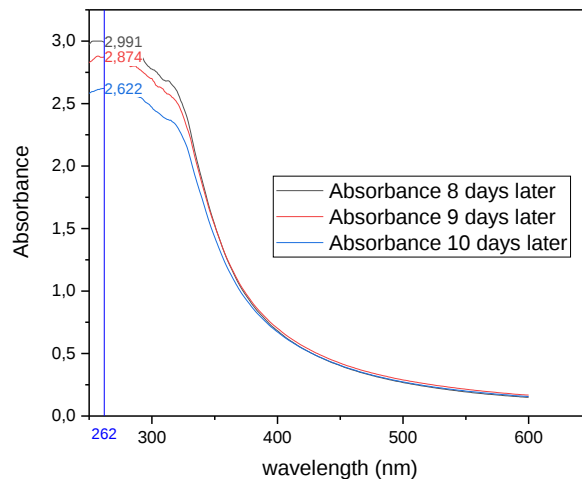


Рисунок 6. Спектры поглощения TiO_2 -наножидкости при добавлении CTAB

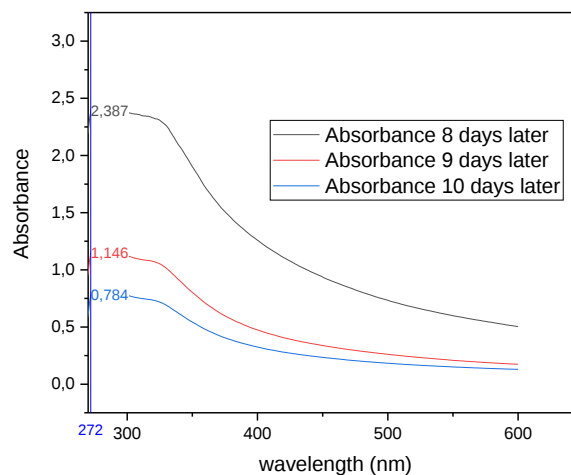


Рисунок 7. Спектры поглощения TiO_2 наножидкости при добавлении SDBS

Графики поглощения для TiO_2/CTAB (рисунок 6) имеют более плавный и равномерный характер осаждения в сравнении с TiO_2/SDBS -бидистиллированная вода (рисунок 7). Скорость осаждения наножидкости TiO_2/CTAB -бидистиллированная вода согласно построенной калибровочной кривой и результатов УФ-вид спектроскопии составляла 0,075 мг/день. Характер осаждения для TiO_2/SDBS -бидистиллированная вода выражен в почти двукратном падении спектра поглощения с 2,387 до 1,146, что говорит о более быстром оседании наночастиц в данном растворе.

Согласно теории ДЛФО, добавление сурфактантов позволяет увеличить электростатическую отталкивающую силу. Агломерация наночастиц связана со стремлением системы уменьшить энергию системы, возникшую в результате появления большой площа-

ди дисперсной фазы. Сурфактант, уменьшая поверхностное натяжение жидкости, приводит к более сильному взаимодействию дисперсной фазы и дисперсионной среды, тем самым компенсируя возникновение свободной поверхности дисперсной фазы в результате диспергирования. Более высокая поверхностная активность ПАВа СТАВ обусловлена длинным гидрофобным хвостом (цетильная группа) по сравнению с SDBS. Таким образом, в ходе проведенных экспериментов можно судить о более эффективном воздействии СТАВ на устойчивость TiO₂-бидистиллированная вода наножидкости в контексте оседания.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Воздействие сурфактантов на стабильность жидкости зависит от структуры сурфактанта и его концентрации. Для ПАВов SDBS и СТАВ соотношение TiO₂/ПАВ 1:0,5 является оптимальным в контексте стабильности. При помощи УФ-вид спектроскопии были получены спектры поглощения наножидкости и определены характер осаждения при комнатной температуре (25 °C). Сурфактант СТАВ обеспечивает более устойчивое состояние TiO₂-наножидкости на основе бидистиллированной воды, что обусловлено структурным строением данного ПАВа, а именно длиной углеводородного «хвоста». Таким образом, более перспективными теплоносителями для гибридных солнечных коллекторов являются наножидкости на основе TiO₂, стабилизированные сурфактантом СТАВ.

Данное исследование финансируется Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (грант № AP19678220).

ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

1. Center for Sustainable Systems, University of Michigan. 2023. "Greenhouse Gases Factsheet." Pub. No. CSS05-21.
2. Friedlingstein P. et al. Global carbon budget 2022 // Earth System Science Data Discussions. – 2022. – Vol. 2022. – P. 1–159.
3. Obaideen K. et al. On the contribution of solar energy to sustainable developments goals: Case study on Mohammed bin Rashid Al Maktoum Solar Park // International Journal of Thermofluids. – 2021. – Vol. 12. – P. 100123.
4. Ахметкалиева С. Перспективный ресурс зеленой энергии в Казахстане: солнечная энергетика / С. Ахметкалиева. – URL: <https://www.eurasian-research.org/publication/a-promising-green-energy-resource-in-kazakhstan-solar-power/?lang=ru> (дата обращения – 07.06.2024) [Akhmetkalieva S. Perspektivnyy resurs zelenoy energii v Kazakhstane: solnechnaya energetika/ S. Akhmetkalieva. (In Russ.)]
5. Maka A. O. M., Alabid J. M. Solar energy technology and its roles in sustainable development // Clean Energy. – 2022. – Vol. 6. – No. 3. – P. 476–483.
6. Menon G. S. et al. Experimental investigations on unglazed photovoltaic-thermal (PVT) system using water and nanofluid cooling medium // Renewable Energy. – 2022. – Vol. 188. – P. 986–996.
7. Ibrahim A. et al. Recent advances in flat plate photovoltaic/thermal (PV/T) solar collectors // Renewable and sustainable energy reviews. – 2011. – Vol. 15. – No. 1. – P. 352–365.
8. Herrando M. et al. A review of solar hybrid photovoltaic-thermal (PV-T) collectors and systems // Progress in Energy and Combustion Science. – 2023. – Vol. 97. – P. 101072.
9. Aste N., Del Pero C., Leonforte F. Water PVT collectors performance comparison // Energy Procedia. – 2017. – Vol. 105. – P. 961–966.
10. Prasetyo S. D., Prabowo A. R., Arifin Z. The use of a hybrid photovoltaic/thermal (PV/T) collector system as a sustainable energy-harvest instrument in urban technology // Heliyon. – 2023. – Vol. 9. – No. 2.
11. Tirupati Rao V., Raja Sekhar Y. Hybrid photovoltaic/thermal (PVT) collector systems with different absorber configurations for thermal management—a review // Energy & Environment. – 2023. – Vol. 34. – No. 3. – P. 690–735.
12. Samykano M. Hybrid photovoltaic thermal systems: Present and future feasibilities for Industrial and building applications // Buildings. – 2023. – Vol. 13. – No. 8. – P. 1950.
13. Otanicar T. A Review of Solar Hybrid Photovoltaic-Thermal (PV-T) Collectors and Systems // Progress in Energy and Combustion Science. – 2023.
14. Hjerrild N. E. et al. Hybrid PV/T enhancement using selectively absorbing Ag–SiO₂/carbon nanofluids // Solar Energy Materials and Solar Cells. – 2016. – Vol. 147. – P. 281–287.
15. Hassani S. et al. Environmental and exergy benefit of nanofluid-based hybrid PV/T systems // Energy Conversion and Management. – 2016. – Vol. 123. – P. 431–444.
16. Lee J. H., Hwang S. G., Lee G. H. Efficiency improvement of a photovoltaic thermal (PVT) system using nanofluids // Energies. – 2019. – Vol. 12. – No. 16. – P. 3063.
17. Diwania S. et al. Performance enrichment of hybrid photovoltaic thermal collector with different nano-fluids // Energy & Environment. – 2023. – Vol. 34. – No. 6. – P. 1747–1769.
18. Aissa A. et al. A review of the enhancement of solar thermal collectors using nanofluids and turbulators // Applied Thermal Engineering. – 2023. – Vol. 220. – P. 119663.
19. Elangovan M. et al. Experimental study of a hybrid solar collector using TiO₂/water nanofluids // Energies. – 2022. – Vol. 15. – No. 12. – P. 4425.
20. Kassymov A., Adylkanova A., Bektemissov A., Astemesova K., Turlybekova G. Intensification of heat transfer in hybrid solar collectors by using nanofluids as a coolant // Доклады НАН РК [Doklady NAN RK]. – 2023. – Vol. 348. – No. 4. – P. 69–79.
21. Chakraborty S., Panigrahi P. K. Stability of nanofluid: A review // Applied Thermal Engineering. – 2020. – Vol. 174. – P. 115259.
22. Okonkwo E. C. et al. An updated review of nanofluids in various heat transfer devices // Journal of Thermal Analysis and Calorimetry. – 2021. – Vol. 145. – P. 2817–2872.
23. Lenin R., Joy P. A., Bera C. A review of the recent progress on thermal conductivity of nanofluid // Journal of Molecular Liquids. – 2021. – Vol. 338. – P. 116929.

24. Pak B. C., Cho Y. I. Hydrodynamic and heat transfer study of dispersed fluids with submicron metallic oxide particles // *Experimental Heat Transfer an International Journal*. – 1998. – Vol. 11. – No. 2. – P. 151–170.
25. Xuan Y., Li Q. Heat transfer enhancement of nanofluids // *International Journal of heat and fluid flow*. – 2000. – Vol. 21. – No. 1. – P. 58–64.
26. Li Y. et al. The effects of activated carbon supports on the structure and properties of TiO₂ nanoparticles prepared by a sol–gel method // *Applied Surface Science*. – 2007. – Vol. 253. – No. 23. – P. 9254–9258.
27. Camps I. et al. Structure-property relationships for Eu doped TiO₂ thin films grown by a laser assisted technique from colloidal sols // *RSC advances*. – 2017. – Vol. 7. – No. 60. – P. 37643–37653.
28. Govindasamy G., Murugasan P., Sagadevan S. Investigations on the synthesis, optical and electrical properties of TiO₂ thin films by chemical bath deposition (CBD) method // *Materials Research*. – 2016. – Vol. 19. – P. 413–419.
29. Ould-Lahoucine C., Ramdani H., Zied D. Energy and exergy performances of a TiO₂-water nanofluid-based hybrid photovoltaic/thermal collector and a proposed new method to determine the optimal height of the rectangular cooling channel // *Solar Energy*. – 2021. – Vol. 221. – P. 292–306.
30. Arifin Z. et al. The application of TiO₂ nanofluids in photovoltaic thermal collector systems // *Energy Reports*. – 2022. – Vol. 8. – P. 1371–1380.
31. Ould-Lahoucine C., Ramdani H., Zied D. Energy and exergy performances of a TiO₂-water nanofluid-based hybrid photovoltaic/thermal collector and a proposed new method to determine the optimal height of the rectangular cooling channel // *Solar Energy*. – 2021. – Vol. 221. – P. 292–306.
32. Elangovan M. et al. Experimental study of a hybrid solar collector using TiO₂/water nanofluids // *Energies*. – 2022. – Vol. 15. – No. 12. – P. 4425.
33. Fudholi A. et al. TiO₂/water-based photovoltaic thermal (PVT) collector: Novel theoretical approach // *Energy*. – 2019. – Vol. 183. – P. 305–314.
34. Amrizal A., Irsyad M., Amrul A. An experimental investigation of TiO₂ nanofluid as a base fluid for PV/T solar collector in low latitude tropical. – 2020.
35. Trefalt G., Borkovec M. Overview of DLVO theory // *Laboratory of Colloid and Surface Chemistry, University of Geneva, Switzerland*. – 2014. – Vol. 304.
36. Chakraborty S., Panigrahi P. K. Stability of nanofluid: A review // *Applied Thermal Engineering*. – 2020. – Vol. 174. – P. 115259.
37. Jehhef K. A. et al. Effect of surfactant addition on the nanofluids properties: A review // *Acta Mechanica Malaysia*. – 2019. – Vol. 2. – No. 2. – P. 1–19.
38. Ghadimi A., Saidur R., Metselaar H. S. C. A review of nanofluid stability properties and characterization in stationary conditions // *International journal of heat and mass transfer*. – 2011. – Vol. 54. – No. 17–18. – P. 4051–4068.
39. Hwang Y. et al. Stability and thermal conductivity characteristics of nanofluids // *Thermochimica Acta*. – 2007. – Vol. 455. – No. 1–2. – P. 70–74.
40. Lee K. et al. Performance evaluation of nano-lubricants of fullerene nanoparticles in refrigeration mineral oil // *Current Applied Physics*. – 2009. – Vol. 9. – No. 2. – P. e128–e131.
41. Kim S. H., Choi S. R., Kim D. Thermal conductivity of metal-oxide nanofluids: particle size dependence and effect of laser irradiation. – 2007.
42. Ghadimi A., Metselaar I. H. The influence of surfactant and ultrasonic processing on improvement of stability, thermal conductivity and viscosity of titania nanofluid // *Experimental Thermal and Fluid Science*. – 2013. – Vol. 51. – P. 1–9.
43. Chang H. et al. Process optimization and material properties for nanofluid manufacturing // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2007. – Vol. 34. – P. 300–306.

ГИБРИДТІ КҮН КОЛЛЕКТОРЛАРЫНДА ПАЙДАЛАНУ МҮМКІНДІГІ ҮШІН TiO₂ НЕГІЗІНДЕГІ НАНОСҰЙЫҚТЫҚТАРДЫҢ ТҰРАҚТЫЛЫҒЫН ЗЕРТТЕУ

А. Ж. Адылканова, А. Б. Касымов*, А. А. Бектемисов, О. А. Степанова, М. В. Ермоленко

«Семей қаласының Шәкәрім атындағы университеті» КеАҚ, Семей, Қазақстан

**Байланыс үшін E-mail: festland2@yandex.kz*

Гибридті күн коллекторларында салқындату жүйесінде наносұйықтықтарды пайдалану жылу алмасуды қарқындатудың өзекті мәселесі болып табылады. Бұл жылу тасымалдағыш күн панельдерінің бетін тиімдірек салқындатуға мүмкіндік береді, бұл коллектордың өнімділігін арттырады. Дегенмен, нанобөлшектердің агломерациясында және олардың кейінгі тұнуында көрінетін наносұйықтықтың төмен тұрақтылығы жылуфизикалық қасиеттерінің нашарлауына әсер етеді. Бұл мақалада СТАВ және SDBS беттік белсенді заттарымен тұрақтандырылған TiO₂-бидистилденген су наносұйықтығының тұну процесі қарастырылады. Тұну процесі УК-визиялық спектроскопия арқылы бақыланды. SDBS қолдануымен салыстырғанда төмен тұну жылдамдығымен ерекшеленген СТАВ беттік-белсенді затының жоғары тұрақтандырушы әсер байқалды.

Түйін сөздер: *гибридті күн коллекторлары, тұрақтылық, наносұйықтық, беттік белсенді заттар, УК-визиялық спектроскопия.*

INVESTIGATION OF STABILITY OF TiO₂-BASED NANOFLUIDS
FOR POTENTIAL USE IN HYBRID SOLAR COLLECTORS

A. Zh. Adylkanova, A. B. Kassymov*, A. A. Bektemissov, O. A. Stepanova, M. V. Yermolenko

NJSC "Shakarim University of Semey", Semey, Kazakhstan

**E-mail for contacts: festland2@yandex.kz*

The use of nanofluids in the cooling system of hybrid solar collectors is an urgent task of intensification of heat transfer. This heat carrier allows for more efficient cooling of the surface of the solar panel, which increases the productivity of the collector. However, the low stability of the nanofluid, manifested in the agglomeration of nanoparticles and their subsequent precipitation, affects the deterioration of the thermophysical properties. This article discusses the sedimentation process of TiO₂-double distilled water nanofluid stabilized with CTAB and SDBS surfactants. The sedimentation process was monitored by UV-vis spectroscopy. A high stabilizing effect was observed with the use of CTAB surfactant, expressed in a low sedimentation rate compared to use of SDBS.

Keywords: *hybrid solar collectors, stability, nanofluid, surfactants, UV-vis spectroscopy.*