https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-3(23)-72

МРНТИ: 29.17.19; 31.15.37; 27.35.49

О.А. Степанова, М.В. Ермоленко, А.А.Бектемисов*, А.Б. Касымов, Т.Н. Умыржан
Шәкәрім университет,
071412, Республика Казахстан, г. Семей, ул. Глинки, 20 А
*e-mail: anuar.bektemissov@icloud.com

ТЕМПЕРАТУРНАЯ ЗАВИСИМОСТЬ ПЛОТНОСТИ НАНОМАСЕЛ TiO_2/ПОДСОЛНЕЧНОЕ МАСЛО И ОЦЕНКА ПРИМЕНИМОСТИ МОДЕЛИ PAK-CHO

Аннотация: *В работе исследована плотность наномасел TiO_2/подсолнечное масло при массовых концентрациях наночастиц 2, 4, 6 и 8 вес.% в температурном диапазоне 20-60 °C. Образцы готовили растворительно-дисперсионным методом: наночастицы TiO_2 вводили в систему подсолнечное масло-гексан, смесь перемешивали на магнитной мешалке, затем диспергировали ультразвуком в течение 30 мин при 30 % мощности и удаляли гексан на ротационном испарителе. Плотность определяли цифровым плотномером DIGIPOL-D50, для каждой температурной точки выполняли пять повторных измерений, что повышало надежность полученных результатов и позволяло оценить воспроизводимость эксперимента. Установлено, что увеличение массовой концентрации TiO_2 повышает плотность наномасла, тогда как рост температуры приводит к ее последовательному снижению. При 20 °C плотность возрастает от 917 кг/м^3 для 2 вес.% до 974 кг/м^3 для 8 вес.%. Такая закономерность объясняется большей собственной плотностью наночастиц TiO_2 по сравнению с базовым растительным маслом. Температурные зависимости описаны линейной регрессионной моделью $\rho = a + bT$, для образцов 6 и 8 вес.% коэффициент детерминации составляет $R^2 = 0{,}98462$. Сравнение с моделью Pak-Cho показало рост отклонения при увеличении содержания TiO_2: MAPE возрастает от 6 до 22%. Полученные данные могут быть использованы при проектировании теплообменных систем, где важны точные сведения о плотности рабочих жидкостей. Это особенно важно при выборе состава наномасла и прогнозировании его поведения в реальных условиях эксплуатации.*

Ключевые слова: *наномасло; TiO_2; подсолнечное масло; плотность; массовая концентрация; DIGIPOL-D50; Pak-Cho.*

Введение

Плотность является одной из ключевых теплофизических характеристик смазочных и теплоносительных жидкостей. Для наномасел этот параметр имеет особое значение, поскольку введение твердой дисперсной фазы изменяет массу единицы объема, влияет на расчет числа Рейнольдса, гидродинамического сопротивления, потерь давления и теплопереноса. Поэтому плотность наножидкости должна определяться экспериментально в том температурном и концентрационном диапазоне, в котором предполагается ее практическое применение.

В последние годы растительные масла рассматриваются как перспективная основа для биоразлагаемых смазочных и теплообменных сред. Cortes et al. [1] исследовали подсолнечное масло, модифицированное наночастицами SiO_2 и TiO_2, и показали применимость таких добавок для изменения реологических и трибологических характеристик биосмазки. Данная работа важна для обоснования выбора системы TiO_2/подсолнечное масло, однако температурная зависимость плотности в ней не была центральным объектом анализа.

Более непосредственное отношение к плотности растительных наножидкостей имеет работа Wanatasanappan et al. [2]. Авторы изучили кокосовое, соевое и пальмовое масла с гибридными наночастицами Al_2O_3-TiO_2 при массовых концентрациях 0,2; 0,4 и 0,6 % в диапазоне 30-60 °C. Было показано, что плотность уменьшается при повышении температуры и возрастает при введении наночастиц. При этом влияние температуры на изменение плотности оказалось более выраженным, чем влияние малых концентраций дисперсной фазы.

©О.А. Степанова, М.В. Ермоленко, А.А.Бектемисов, А.Б. Касымов, Т.Н. Умыржан, 2026

Oemar et al. [3] исследовали наножидкость TiO_2 на основе virgin coconut oil. Образцы с объемными концентрациями TiO_2 0,1; 0,3 и 0,5 % были изучены при 28, 40 и 100 °C, плотность определяли пикнометрическим методом. Авторы установили, что добавление TiO_2 повышает плотность базового масла, а максимальное увеличение наблюдается при наибольшем содержании наночастиц. Этот результат подтверждает определяющую роль плотной твердой фазы в формировании объемных свойств масляной нанодисперсии.

Для синтетических смазочных систем сходные закономерности показаны Puspitasari et al. [4] на примере моторного масла SAE 5W-30 с наночастицами Al_2O_3, TiO_2 и гибридной системой Al_2O_3-TiO_2. В работе определялись плотность, динамическая вязкость и теплопроводность наномасел, что подтверждает актуальность комплексного измерения термофизических свойств при разработке наномодифицированных смазочных материалов.

В исследовании Magaji et al. [5] рассмотрена био-масляная бинарная наножидкость Al_2O_3-TiO_2/palm kernel oil в диапазоне 30-60 °C. Авторы показали, что плотность как чистого растительного масла, так и наножидкости снижается при нагреве, для чистого palm kernel oil снижение плотности составило 2,48 %, а для 0,3 вес.% Al_2O_3-TiO_2/palm kernel oil – 2,89 %. Эти данные подтверждают, что температурное расширение базовой масляной фазы остается доминирующим фактором даже после введения оксидных наночастиц.

Следовательно, современные исследования 2020-2025 гг. показывают две устойчивые закономерности: введение оксидных наночастиц повышает плотность масляной среды, а увеличение температуры приводит к снижению плотности вследствие теплового расширения базовой жидкости. Вместе с тем данные по плотности наномасел TiO_2 именно на основе подсолнечного масла остаются ограниченными. Дополнительная сложность связана с тем, что образцы часто готовятся по массовой концентрации, тогда как классическая модель Pak-Cho использует объемную долю частиц. Это требует четкого указания единиц концентрации и осторожной интерпретации расчетных сравнений.

Цель настоящей работы состояла в экспериментальном определении плотности наномасел TiO_2/подсолнечное масло при массовых концентрациях 2, 4, 6 и 8 вес.% в диапазоне 20-60 °C, описании температурной зависимости линейной регрессионной моделью и оценке отклонения экспериментальных значений от расчетных значений, полученных по модели Pak-Cho.

Материалы и методы

Материалы

В качестве базовой жидкости использовали подсолнечное масло. Дисперсной фазой служили наночастицы диоксида титана TiO_2. Для снижения вязкости исходной масляной среды и облегчения распределения частиц применяли гексан как летучий растворитель. Были подготовлены четыре состава наномасла с массовыми концентрациями TiO_2 2, 4, 6 и 8 вес.%.

Массовую концентрацию наночастиц рассчитывали по выражению:

$$w = \frac{m_p}{m_p + m_{bf}} \cdot 100\%, \quad (1)$$

где w – массовая концентрация TiO_2, вес.%;

m_p – масса наночастиц TiO_2;

m_{bf} – масса базового подсолнечного масла.

При фиксированной массе базовой жидкости требуемую массу наночастиц определяли как:

$$m_p = \frac{w}{100 - w} \cdot m_{bf} \quad (2)$$

Такой способ расчета состава означает, что значения 2, 4, 6 и 8 % в настоящей работе являются массовыми процентами. Обозначение объемной концентрации для этих образцов не применяли.

Приготовление наномасел

Наномасла готовили растворительно-дисперсионным методом. На первом этапе расчетное количество TiO_2 вводили в смесь подсолнечного масла и гексана. Смесь перемешивали на магнитной мешалке до получения первичной суспензии. На втором этапе суспензию подвергали ультразвуковому диспергированию в течение 30 мин при 30%

мощности прибора. Ультразвуковая обработка использовалась для разрушения возможных агрегатов TiO_2 и повышения равномерности распределения частиц в масляной среде.

После диспергирования гексан удаляли на ротационном испарителе. Данная стадия обеспечивала отделение летучего растворителя и получение конечного наномасла TiO_2/подсолнечное масло без остаточного гексана. Подготовленные образцы далее использовали для определения плотности.

Методика приготовления наномасла TiO_2/подсолнечное масло и стадия удаления гексана на ротационном испарителе представлена на рисунке 1.

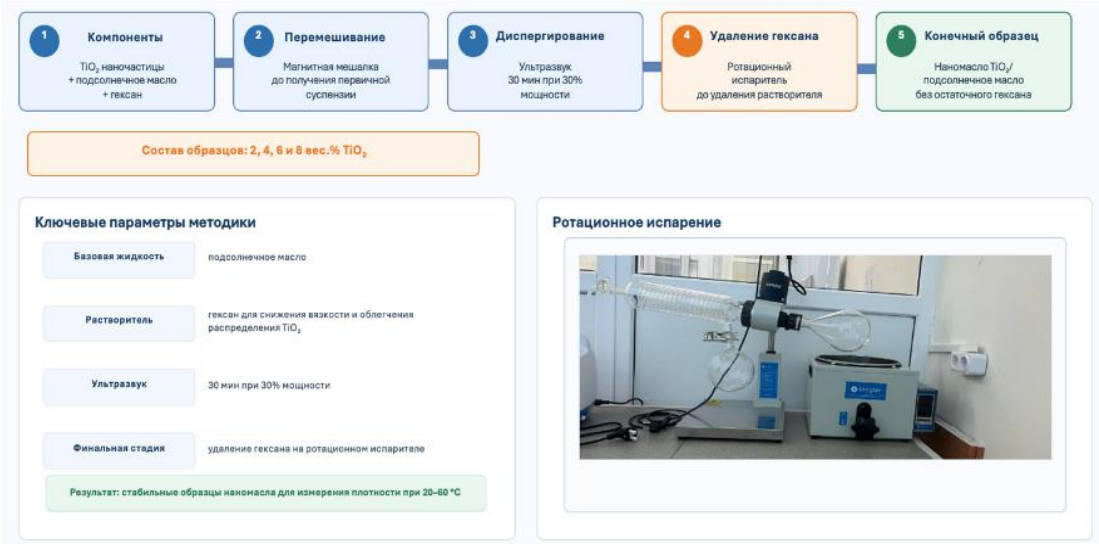


Рисунок 1 – Методика приготовления наномасла TiO_2/подсолнечное масло и стадия удаления гексана на ротационном испарителе

Измерение плотности

Плотность определяли на цифровом плотномере DIGIPOL-D50 (рис. 2). Прибор относится к автоматическим плотномерам, в которых плотность жидкости определяется по изменению периода колебаний измерительной U-образной трубки. Такой принцип позволяет регистрировать плотность малых объемов жидкости, а видеоконтроль измерительной ячейки используется для проверки отсутствия пузырьков воздуха в пробе [6].

Измерения выполняли при температурах 20, 30, 40, 50 и 60°C. Для каждой концентрации и каждой температурной точки проводили пять повторных измерений. Перед регистрацией значения образец выдерживали до стабилизации температурного режима, после чего фиксировали показания плотномера.



Рисунок 2 – Цифровой плотномер DIGIPOL-D50, использованный для определения плотности наномасел

Среднее значение плотности для каждой серии рассчитывали по формуле [7]:

$$\overline{\rho_{J,t}} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^{n} \rho_{j,t,i} \quad (3)$$

где $\overline{\rho_{j,t}}$ – средняя плотность образца j при температуре T;

$\rho_{j,t,i}$ – результат i-го измерения; n = 5.

Разброс повторных измерений оценивали по стандартному отклонению [7]:

$$s_{j,t} = \frac{\sqrt{(\sum_{i=1}^{n}(\rho_{j,t,i} - \overline{\rho_{j,t}})^2}}{n-1} \quad (4)$$

Обработка данных и расчетные модели

Температурную зависимость плотности аппроксимировали линейным уравнением [7]:

$$\rho = a + bT \quad (5)$$

где ρ – плотность, кг/м^3;

T – температура, °C;

a – свободный член;

b – температурный коэффициент плотности.

Плотность наномасел TiO_2/подсолнечное масло определяли с использованием цифрового плотномера DIGIPOL-D50. Принцип работы цифровых плотномеров данного типа основан на измерении периода колебаний U-образной измерительной трубки, заполненной исследуемой жидкостью. При изменении плотности образца изменяется масса колебательной системы, что приводит к изменению периода её колебаний. В общем виде связь между плотностью жидкости и периодом колебаний измерительной ячейки может быть представлена следующим выражением [8]:

$$\rho_{nf} = \frac{T^2 - C_2}{C_1} \quad (6)$$

где ρ_{nf} – плотность наномасла, кг/м^3;

T – период колебаний измерительной ячейки плотномера, с;

C_1 и C_2 – калибровочные константы прибора.

В литературе аналогичный подход к оценке плотности масляных наножидкостей применяется при исследовании растительно-масляных нанолубрикантов. Так, Wang et al. [8] рассматривали наножидкости на основе растительных масел как перспективные смазочные среды и показали, что введение наночастиц позволяет изменять эксплуатационные характеристики базового масла. Эта работа подтверждает целесообразность использования растительных масел в качестве основы для получения наномодифицированных смазочных материалов.

Для теоретической оценки плотности наномасел в настоящей работе использовали корреляцию Pak-Cho, основанную на правиле смешения плотностей базовой жидкости и твёрдой дисперсной фазы [9]:

$$\rho_{nf} = \varphi\rho_p + (1-\varphi)\rho_{bf,} \quad (7)$$

где ρ_{nf} – расчётная плотность наномасла, кг/м^3;

ρ_p – плотность наночастиц TiO_2, кг/м^3;

ρ_{bf} – плотность базового подсолнечного масла, кг/м^3;

φ – объёмная доля наночастиц.

Расхождение между экспериментальными и расчётными значениями плотности оценивали по среднеквадратичной ошибке RMSE и средней абсолютной процентной ошибке MAPE [10, 11]:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1\sum_{i=1}^{N}(\rho_{exp,i} - \rho_{calc,i})^2}{N}}, \quad (8)$$

$$MAPE = \frac{100}{n}\sum_{i=1}^{n}\left|\frac{\rho_{exp,i-\rho_{theory,i}}}{\rho_{exp,i}}\right|, \quad (9)$$

где $\rho_{exp,i}$ – экспериментальная плотность, кг/м^3;

$\rho_{calc,i}$ – плотность, рассчитанная по модели, кг/м^3;

N – число температурных точек.

Результаты

Экспериментальные значения плотности

На рисунке 3 представлена зависимость плотности наномасел TiO_2/подсолнечное масло от температуры при массовых концентрациях наночастиц 2, 4, 6 и 8 вес.%. Во всем исследованном температурном диапазоне увеличение массовой концентрации TiO_2 приводит к росту плотности. При 20°C плотность образца с 2 вес.% составляет 917 кг/м^3, тогда как для 8 вес.% она равна 974 кг/м^3. Следовательно, повышение концентрации TiO_2 с 2 до 8 вес.% увеличивает плотность на 57 кг/м^3.

Повышение температуры сопровождается снижением плотности всех исследованных образцов. Для наномасла с 8 вес.% TiO_2 плотность уменьшается с 974 кг/м^3 при 20°C до 947 кг/м^3 при 60 °C. Для образца с 6 вес.% снижение составляет 27 кг/м^3, для 4 вес.% – 22 кг/м^3. Образец с 2 вес.% демонстрирует небольшое повышение плотности в интервале 20-30 °C, однако при дальнейшем нагреве его плотность последовательно уменьшается до 900 кг/м^3.

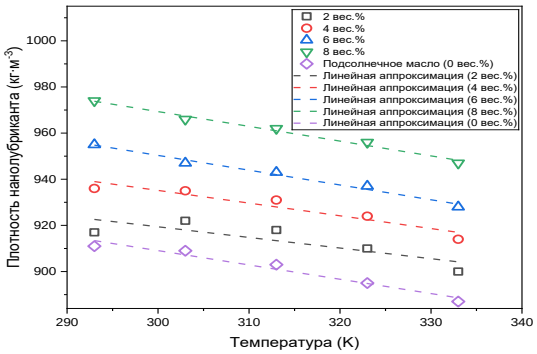


Рисунок 3 – Зависимость плотности наномасел TiO_2/подсолнечное масло от температуры при массовых концентрациях 2, 4, 6 и 8 вес.%

Линейная аппроксимация температурной зависимости

Для количественного описания снижения плотности с ростом температуры была применена линейная регрессионная модель $\rho = a + bT$. Коэффициенты регрессионного анализа представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Коэффициенты регрессионного анализа плотности наномасел TiO_2/подсолнечное масло в зависимости от температуры

Система	C(TiO_2), вес.%	T, °C	Модель	a, кг/м^3	b, кг/(м^3·°C)	R^2
Наномасло TiO_2/масло	2	20-60	$\rho = a + bT$	931,73	- 0,46	0,70722
Наномасло TiO_2/масло	4	20-60	$\rho = a + bT$	949,92	- 0,55	0,90569
Наномасло TiO_2/масло	6	20-60	$\rho = a + bT$	967,50	- 0,64	0,98462
Наномасло TiO_2/масло	8	20-60	$\rho = a + bT$	986,50	- 0,64	0,98462
Подсолнечное масло	-	20-60	$\rho = a + bT$	925,71	- 0,62	0,96100

Таблица 1 показывает, что для всех исследованных образцов коэффициент b имеет отрицательное значение, что подтверждает снижение плотности при повышении температуры. Для наномасел с концентрациями 2, 4, 6 и 8 вес.% значения b составили соответственно -0,46; -0,55; -0,64 и -0,64 кг/(м^3·°C). Для базового подсолнечного масла коэффициент наклона был равен -0,62 кг/(м^3·°C). Следовательно, в диапазоне 20-60 °C плотность исследованных образцов изменяется преимущественно по линейному закону.

Наиболее высокие значения коэффициента детерминации получены для наномасел с концентрациями 6 и 8 вес.% TiO_2, для которых R^2 = 0,98462. Это указывает на хорошее соответствие экспериментальных данных линейной модели. Для образца с концентрацией 4 вес.% значение R^2 составило 0,90569, что также подтверждает приемлемую точность аппроксимации. Более низкое значение R^2 = 0,70722 для образца с 2 вес.% может быть связано с большим разбросом экспериментальных точек при низкой концентрации наночастиц.

Сравнение с моделью Pak-Cho

Для количественной оценки расхождения между экспериментальными значениями плотности и расчетными значениями по модели Pak-Cho были рассчитаны RMSE и MAPE. В данной части анализа концентрация на оси графика указана как массовая концентрация TiO_2, поскольку именно так были приготовлены образцы (рис. 4). Показатели отклонения экспериментальных значений плотности от модели Pak-Cho представлены в таблице 2.

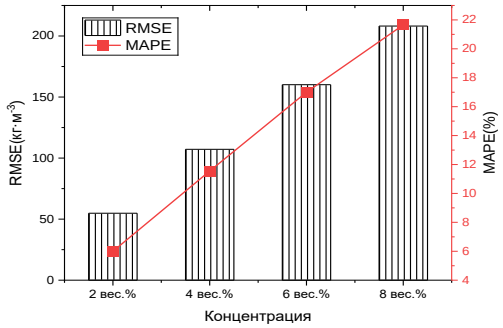


Рисунок 4 – Оценка отклонения экспериментальных значений плотности от расчетных значений по модели Pak-Cho для наномасел с различной массовой концентрацией TiO_2

Таблица 2 – Показатели отклонения экспериментальных значений плотности от модели Pak-Cho

Концентрация TiO_2, вес.%	RMSE, кг/м^3	MAPE, %
2	55	6
4	107	12
6	160	17
8	208	22

Значения ошибок возрастают с увеличением содержания TiO_2. Для концентрации 2 вес.% RMSE составляет 55 кг/м^3, а MAPE – 6 %. При увеличении концентрации до 8 вес.% эти показатели возрастают до 208 кг/м^3 и 22 % соответственно. Следовательно, простая модель смешения лучше согласуется с экспериментальными данными при низком содержании наночастиц и хуже описывает систему при повышенной массовой концентрации дисперсной фазы.

Обсуждение

Рост плотности при увеличении концентрации TiO_2 имеет физически ожидаемый характер. Плотность минеральной твердой фазы значительно выше плотности подсолнечного масла, поэтому увеличение массовой доли TiO_2 повышает массу единицы объема дисперсной системы. Эта закономерность сохраняется при всех исследованных температурах, что указывает на устойчивое влияние концентрационного фактора.

Снижение плотности при нагреве связано главным образом с тепловым расширением базового масла. Наличие TiO_2 повышает абсолютные значения плотности, однако не устраняет температурное расширение жидкой фазы. Поэтому для всех концентраций коэффициент наклона линейной зависимости отрицателен. Близкие значения коэффициента b для 6 и 8 вес.% указывают на сходную температурную чувствительность этих составов в диапазоне 20-60°C.

Более низкое качество линейной аппроксимации для 2 вес.% можно объяснить тем, что при малой концентрации вклад наночастиц в изменение плотности сравнительно невелик и становится сопоставимым с экспериментальным разбросом. Небольшое отклонение в области 20-30 °C не изменяет общего вывода о снижении плотности при повышении температуры.

Увеличение ошибки модели Pak-Cho при переходе от 2 к 8 вес.% связано с ограничениями правила идеального смешения. Модель не учитывает агломерацию частиц, межчастичные взаимодействия, формирование межфазного слоя на поверхности TiO_2 и возможную неоднородность распределения частиц в масляной среде. Кроме того, классическая запись модели оперирует объемной долей частиц, тогда как

экспериментальные образцы задавались по массе. Поэтому для последующего уточнения расчетов необходимо явно пересчитывать массовую долю в объемную с учетом плотности TiO_2 и плотности базового масла.

Заключение

В работе экспериментально определена плотность наномасел TiO_2/подсолнечное масло при массовых концентрациях 2, 4, 6 и 8 вес.% в температурном диапазоне 20-60°C. Увеличение массовой концентрации TiO_2 приводит к повышению плотности наномасла. При 20 °C плотность возрастает от 917 кг/м^3 для 2 вес.% до 974 кг/м^3 для 8 вес.%.

Повышение температуры вызывает снижение плотности всех исследованных образцов. Для состава 8 вес.% плотность уменьшается с 974 до 947 кг/м^3 при нагреве от 20 до 60 °C. Температурные зависимости плотности описываются линейными уравнениями с отрицательными коэффициентами наклона. Наиболее высокое качество аппроксимации получено для 6 и 8 вес.% TiO_2, где $R^2 = 0{,}98462$.

Сравнение с моделью Pak-Cho показало рост отклонения при увеличении концентрации TiO_2: MAPE возрастает от 6 % для 2 вес.% до 22 % для 8 вес.%. Это указывает на ограниченную применимость простой модели смешения при повышенном содержании наночастиц в масляной среде. Полученные данные могут быть использованы при расчете теплоофизических характеристик наномасел TiO_2/подсолнечное масло и выборе концентрационного диапазона для дальнейших исследований смазочных и теплообменных свойств таких систем.

Список литературы

1. The Performance of SiO2 and TiO2 Nanoparticles as Lubricant Additives in Sunflower Oil / V. Cortes et al // Lubricants. – 2020. – № 8(1). – P. 10. https://doi.org/10.3390/lubricants8010010.
2. Wanatasanappan V.V. Thermophysical Properties of Vegetable Oil-Based Hybrid Nanofluids Containing Al2O3-TiO2 Nanoparticles as Insulation Oil for Power Transformers / V.V. Wanatasanappan, M. Rezman, M.Z. Abdullah // Nanomaterials. – 2022. – № 12(20). – P. 3621. https://doi.org/10.3390/nano12203621.
3. Experimental Investigation on Thermophysical and Stability Properties of TiO2/Virgin Coconut Oil Nanofluid / B. Oemar et al // Science and Technology Indonesia. – 2023. – № 8(2). – P. 178-183. https://doi.org/10.26554/sti.2023.8.2.178-183.
4. Thermophysical properties of SAE 5W-30 lubricant with Al2O3, TiO2, and hybrid Al2O3/TiO2 nanomaterial using oleic acid surfactant on motorcycle performance / P. Puspitasari et al // PROCEEDINGS OF THE INTERNATIONAL CONFERENCE ON GREEN ENGINEERING & TECHNOLOGY 2022 (ICONGETECH 2022). https://doi.org/10.1063/5.0198587.
5. Experimental Investigations of a Bio-oil-Based Binary Nanofluid as a Heat Transfer Fluid in Solar Thermal Systems / I.K. Magaji et al // Jurnal Kejuruteraan. – 2025. – Vol. 37, № 8. – P. 3655-3672. https://doi.org/10.17576/jkukm-2025-37(8)-01.
6. DigiPol-D50/D70 Density Meter: technical specification and user manual for automatic U-tube density meters.
7. NIST/SEMATECH. e-Handbook of Statistical Methods. National Institute of Standards and Technology. https://doi.org/10.18434/M32189
8. Comparative evaluation of the lubricating properties of vegetable-oil-based nanofluids between frictional test and grinding experiment / Y. Wang et al // J. Manuf. Process. – 2017. – № 26. – P. 94-104. https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2017.02.001.
9. Pak B.C. HYDRODYNAMIC AND HEAT TRANSFER STUDY OF DISPERSED FLUIDS WITH SUBMICRON METALLIC OXIDE PARTICLES / B.C. Pak, Y.I. Cho // Experimental Heat Transfer. – 1998. – № 11(2). – P. 151-170. https://doi.org/10.1080/08916159808946559.
10. Chai T. Root mean square error (RMSE) or mean absolute error (MAE)? – Arguments against avoiding RMSE in the literature / T. Chai, R.R. Draxler, // Geosci. Model Dev. – 2014. – № 7. – P. 1247-1250. https://doi.org/10.5194/gmd-7-1247-2014.
11. Hyndman R.J. Another look at measures of forecast accuracy / R.J. Hyndman, A.B. Koehler // International Journal of Forecasting. – 2006. – Vol. 22, № 4. – P. 679-688. https://doi.org/10.1016/j.ijforecast.2006.03.001.

Сведения о финансировании

Данное исследование финансируется Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (грант № AP26100207).

О.А. Степанова, М.В. Ермоленко, А.А. Бектемисов*, А.Б. Касымов, Т.Н. Умыржан
Шәкәрім университеті,
071412, Қазақстан Республикасы, Семей қаласы, Глинка көшесі, 20А
*e-mail: anuar.bektemissov@icloud.com

TIO_2/КҮНБАҒЫС МАЙЫ НАНОМАЙЛАРЫНЫҢ ТЫҒЫЗДЫҒЫНЫҢ ТЕМПЕРАТУРАҒА ТӘУЕЛДІЛІГІ ЖӘНЕ PAK-CHO МОДЕЛІНІҢ ҚОЛДАНЫЛУ МҮМКІНДІГІН БАҒАЛАУ

Бұл жұмыста TiO_2 /күнбағыс майы негізіндегі наномайлардың тығыздығы нанобөлшектердің 2, 4, 6 және 8 масс.% концентрацияларында, 20-60°C температура аралығында зерттелді. Үлгілер еріткіш-дисперсиялық әдіспен дайындалды: TiO_2 нанобөлшектері күнбағыс майы–гексан жүйесіне енгізіліп, қоспа магниттік араластырғышта араластырылды, содан кейін 30% қуатта 30 минут бойы ультрадыбыспен диспергирленді, ал гексан ротациялық буландырғышта жойылды. Тығыздық DIGIPOL-D50 цифрлық тығыздық өлшегішімен анықталды. Әрбір температуралық нүктеде бес қайталама өлшеу жүргізілді, бұл алынған нәтижелердің сенімділігін арттырып, эксперименттің қайталанғыштығын бағалауға мүмкіндік берді. TiO_2 массалық концентрациясының артуы наномай тығыздығын жоғарылататыны, ал температураның жоғарылауы оның біртіндеп төмендеуіне әкелетіні анықталды. 20 °C температурада тығыздық 2 масс.% үшін 917 кг/м^3 мәнінен 8 масс.% үшін 974 кг/м^3 мәніне дейін өсті. Бұл заңдылық TiO_2 нанобөлшектерінің меншікті тығыздығы базалық өсімдік майымен салыстырғанда жоғары болуымен түсіндіріледі. Температуралық тәуелділіктер $\rho = a + bT$ сызықтық регрессиялық моделімен сипатталды; 6 және 8 масс.% үлгілері үшін детерминация коэффициенті $R^2 = 0{,}98462$ болды. Pak-Cho моделімен салыстыру TiO_2 мөлшері артқан сайын ауытқудың өсетінін көрсетті: MAPE 6%-дан 22%-ға дейін артты. Алынған деректер жұмыс сұйықтықтарының тығыздығы туралы нақты мәліметтер қажет болатын жылуалмастырғыш жүйелерді жобалауда қолданылуы мүмкін. Бұл наномай құрамын таңдауда және оның нақты пайдалану жағдайларындағы мінез-құлқын болжауда ерекше маңызды.

Түйін сөздер*: *наномай; TiO_2; күнбағыс майы; тығыздық; массалық концентрация; DIGIPOL-D50; Pak–Cho.

O.A. Stepanova, M.V. Yermolenko, A.A. Bektemissov*, A.B. Kassymov, T.N. Umyrzhan
Shakarim University,
071412, Republic of Kazakhstan, Semey, 20A Glinka St.
*e-mail: anuar.bektemissov@icloud.com

TEMPERATURE DEPENDENCE OF THE DENSITY OF TIO_2/SUNFLOWER OIL NANO-OILS AND ASSESSMENT OF THE APPLICABILITY OF THE PAK-CHO MODEL

This study investigated the density of TiO_2/sunflower oil nano-oils at nanoparticle mass concentrations of 2, 4, 6, and 8 wt.% over a temperature range of 20-60°C. The samples were prepared using a solvent-dispersion method: TiO_2 nanoparticles were introduced into a sunflower oil–hexane system, mixed on a magnetic stirrer, then ultrasonically dispersed for 30 minutes at 30% power, and the hexane was removed using a rotary evaporator. Density was measured using a DIGIPOL-D50 digital density meter. Five repeated measurements were performed at each temperature point, which improved the reliability of the results and allowed the reproducibility of the experiment to be assessed. It was found that increasing the mass concentration of TiO_2 increased the density of the nano-oil, whereas increasing temperature led to a gradual decrease in density. At 20 °C, the density increased from 917 kg/m^3 for 2 wt.% to 974 kg/m^3 for 8 wt.%. This trend is explained by the higher intrinsic density of TiO_2 nanoparticles compared with the base vegetable oil. The temperature dependences were described using a linear regression model, $\rho = a + bT$; for the 6 and 8 wt.% samples, the coefficient of determination was $R^2 = 0.98462$. Comparison with the Pak–Cho model showed that the deviation increased with increasing TiO_2 content: MAPE rose from 6% to 22%. The obtained data can be used in the design of heat-exchange systems where accurate information on the density of working fluids is required. This is particularly important when selecting the nano-oil composition and predicting its behavior under real operating conditions.

***Key words:** nano-oil; TiO_2; sunflower oil; density; mass concentration; DIGIPOL-D50; Pak-Cho.*

Сведения об авторах

Ольга Александровна Степанова – кандидат технических наук, профессор, заведующая кафедрой «Техническая физика и теплоэнергетика», Шәкәрім университет, Республика Казахстан; e-mail: aug11@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5221-1772.

Михаил Вячеславович Ермоленко – кандидат технических наук, ассоциированный профессор, старший преподаватель кафедры «Техническая физика и теплоэнергетика», Шәкәрім университет, Республика Казахстан; e-mail: tehfiz@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002- 1677-8023.

Ануар Алмасбекович Бектемисов* – научный сотрудник кафедры «Техническая физика и теплоэнергетика», Шәкәрім университет, Республика Казахстан; e-mail: anuar.bektemissov@icloud.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0364-4632.

Аскар Багдатович Касымов – PhD, Член правления-проректор по стратегии и социальному развитию, Шәкәрім университет, Республика Казахстан; e-mail: askar.kassymov@shakarim.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1983-6508.

Темірлан Нұрланұлы Умыржан – докторант образовательной программы 8D05302-«Техническая физика» кафедры «Техническая физика и теплоэнергетика», Шәкәрім университет, Республика Казахстан; e-mail: timirlan-95@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0008-9111-1975.

Авторлар туралы мәліметтер

Ольга Александровна Степанова – техника ғылымдарының кандидаты, профессор, «Техникалық физика және жылу энергетикасы» кафедрасының меңгерушісі, Шәкәрім университеті, Қазақстан Республикасы; e-mail: aug11@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5221-1772.

Михаил Вячеславович Ермоленко – техника ғылымдарының кандидаты, қауымдастырылған профессор, «Техникалық физика және жылу энергетикасы» кафедрасының аға оқытушысы, Шәкәрім университеті, Қазақстан Республикасы; e-mail: tehfiz@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1677-8023.

Ануар Алмасбекович Бектемисов* – «Техникалық физика және жылуэнергетика» кафедрасының ғылыми қызметкері, Шәкәрім университеті, Қазақстан Республикасы; e-mail: anuar.bektemissov@icloud.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0364-4632.

Аскар Багдатович Касымов – PhD, Басқарма мүшесі-стратегия және әлеуметтік даму жөніндегі проректор, Шәкәрім университеті, Қазақстан Республикасы; e-mail: askar.kassymov@shakarim.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1983-6508.

Темірлан Нұрланұлы Умыржан – «Техникалық физика және жылу энергетикасы» кафедрасының 8D05302-«Техникалық физика» білім беру бағдарламасының докторанты, Шәкәрім университеті, Қазақстан Республикасы; e-mail: timirlan-95@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0008-9111-1975.

Information about the authors

Olga Aleksandrovna Stepanova – Candidate of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of «Technical Physics and Heat Power Engineering», Shakarim University, Republic of Kazakhstan; e-mail: aug11@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5221-1772.

Mikhail Vyacheslavovich Yermolenko – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Senior Lecturer at the Department of «Technical Physics and Heat Power Engineering», Shakarim University, Republic of Kazakhstan; e-mail: tehfiz@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1677-8023.

Anuar Almasbekovich Bektemissov* – Researcher, Department of Technical Physics and Heat Power Engineering; Shakarim University, Republic of Kazakhstan; e-mail: anuar.bektemissov@icloud.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0364-4632.

Askar Bagdatovich Kassymov – PhD, Member of the Board - Vice-Rector for Strategy and Social Development, Shakarim University, Republic of Kazakhstan; e-mail: askar.kassymov@shakarim.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1983-6508.

Temirlan Nurlanuly Umyrzhan – doctoral student of the educational programme 8D05302-«Technical Physics» of the Department of «Technical Physics and Heat Power Engineering», Shakarim University, Republic of Kazakhstan; e-mail: timirlan-95@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0008-9111-1975.

Поступила в редакцию 12.06.2026
Поступила после доработки 23.07.2026
Принята к публикации 24.07.2026