

Aigerim Erkenovna Satybaldinova – Master of Technical Sciences, Lecturer, Department of «Technical Physics and Heat Power Engineering», Shakarim University, Republic of Kazakhstan; e-mail: aigerimsemei@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-7610-9058>.

Sergey Lvovich Elistratov – doctor of technical sciences, professor of the Department of «Heat Power Plants», Novosibirsk State Technical University, Russian Federation; e-mail: elistratov@corp.nstu.ru.

Поступила в редакцию 05.01.2026

Поступила после доработки 27.02.2026

Принята к публикации 10.03.2026

[https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-1\(21\)-62](https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-1(21)-62)



МРНТИ: 29.17.19

А.Б. Касымов, Т.Н. Умыржан*, А.А. Бектемисов, Ж.Қ. Акишов, Д.Н. Нурғалиев

Шәкәрім университет,
071412, Республика Казахстан, г. Семей, ул. Глинка, 20 А
*e-mail: timirlan-95@mail.ru

ВЛИЯНИЕ ГИБРИДНЫХ НАНОЧАСТИЦ $\text{TiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ НА ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА РАСТИТЕЛЬНЫХ МАСЕЛ

Аннотация: Растительные масла рассматриваются как перспективные базовые жидкости для наномасел, однако их практическое применение определяется условием между ростом теплопроводности и увеличением вязкостных потерь. В работе экспериментально исследовано влияние гибридной дисперсной фазы $\text{TiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ на теплопроводность $\lambda(T)$ и кинематическую вязкость $\nu(T)$ наномасел на основе оливкового и подсолнечного масел. Наномасла получали двухэтапным методом при суммарной концентрации твердой фазы 2 vol.% с ультразвуковой гомогенизацией; теплопроводность измеряли анализатором TEMPOS, а кинематическую вязкость определяли капиллярной вискозиметрией (ВПЖ-2) в диапазоне 20-50 °C (293-323 K).

Установлено, что для базовых масел ν закономерно уменьшается с повышением температуры, тогда как введение $\text{TiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ приводит к росту кинематической вязкости на 17,5% по сравнению с соответствующими базовыми маслами во всем диапазоне температур. Теплопроводность базовых масел изменяется слабо и демонстрирует умеренное снижение при нагреве, а добавление $\text{TiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ повышает λ на 5%. Полученные зависимости $\lambda(T)$ и $\nu(T)$ могут быть использованы для обоснования выбора состава наномасла с учетом баланса усиления теплопереноса и роста гидравлических потерь.

Ключевые слова: растительные масла; наномасло; гибридные наночастицы; TiO_2 ; Al_2O_3 ; теплофизические свойства; температурная зависимость

Введение

Растительные масла рассматриваются как перспективные базовые жидкости для наножидкостей благодаря биоразлагаемости, доступности и выраженным смазывающим свойствам. Вместе с тем их практическая применимость определяется соотношением между возможным усилением теплопереноса и увеличением вязкостных потерь, однако введение наночастиц, как правило, повышает эффективную теплопроводность, однако нередко сопровождается ростом вязкости, особенно при повышенных концентрациях и недостаточно устойчивой дисперсии.

Существенную роль играет температура, в рабочем диапазоне вязкость растительных масел закономерно уменьшается при нагреве, тогда как температурная зависимость теплопроводности определяется составом базовой жидкости и дисперсной фазы и поэтому должна быть установлена либо прямыми экспериментальными измерениями, либо на основе согласованного массива опорных данных. В литературе представлены как исследования термофизических свойств растительных масел, модифицированных гибридными оксидными добавками, так и работы, посвященные наномаслам для технологических применений (например, MQL), где ключевыми характеристиками выступают $\lambda(T)$ и $\nu(T)$ [1-4].

А.Б. Касымов, Т.Н. Умыржан, А.А. Бектемисов, Ж.Қ. Акишов, Д.Н. Нурғалиев, 2026

Как следует из таблицы 1, основное внимание в литературе уделяется влиянию температуры и общей концентрации наночастиц, тогда как влияние соотношения компонентов гибридных оксидов при фиксированной суммарной концентрации исследовано ограниченно.

Таблица 1 – Примеры исследований наножидкостей на растительных маслах

Источник	Базовая жидкость, добавка, условия и ключевые выводы
Wanatasanappan et al. (2022) [5]	Кокосовое, соевое, пальмовое масла; гибриды $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$ (50:50), 0,2-0,6 wt.%, 30-60 °C. Влияние температуры и концентрации на λ и вязкость; эффект концентрации снижается при $T > 50$ °C.
Sarafraz et al. (2016) [6]	Кокосовое масло; Ag, 0,5-1,5 wt.%, 25-85 °C. Экспериментальные данные λ и вязкости; наночастицы повышают λ и увеличивают вязкость.
Jyothish et al. (2022) [7]	Подсолнечная олеиновая основа; $\text{ZnTiO}_3/\text{BN}/\text{CuO}$, 1-4 wt.%, 30-70 °C. Температурные и концентрационные эффекты для условий MQL.

В работе в качестве базовых жидкостей использованы оливковое и подсолнечное масла, а дисперсная фаза представлена гибридной системой $\text{TiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$, при фиксированной суммарной концентрации 2 vol.%. Исследование направлено на сопоставление влияния соотношения $\text{TiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ на теплопроводность и кинематическую вязкость в диапазоне 20-50 °C (293-323 K) и построение зависимостей позволяющих обосновать выбор рационального соотношения компонентов. Научная новизна работы заключается в экспериментальном исследовании теплофизических свойств наномасел на основе оливкового и подсолнечного масел с гибридной дисперсной фазой $\text{TiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ при фиксированной суммарной концентрации наночастиц. В отличие от большинства опубликованных работ, где анализируется влияние общей концентрации наночастиц, в настоящем исследовании рассматривается влияние гибридной оксидной системы на температурные зависимости теплопроводности и кинематической вязкости растительных масел.

Материалы и методы

В качестве базовых жидкостей использованы оливковое масло и подсолнечное масло. В качестве дисперсной фазы применяли наночастицы TiO_2 и Al_2O_3 (производитель Sigma-Aldrich). Согласно паспортным данным, средний размер частиц составляет ≤ 50 нм. В качестве временного растворителя для облегчения смачивания и первичного распределения наночастиц в масляной среде использовали гексан.

Наномасла получали двухэтапным методом при фиксированной суммарной концентрации твёрдой фазы 2 vol.%. Составы формировали изменением соотношения компонентов гибридной системы $\text{TiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ при постоянной общей объемной доле наночастиц. Схема приготовления наномасел $\text{TiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ на основе оливкового и подсолнечного масел (двухэтапный метод), представлен на рисунке 1.

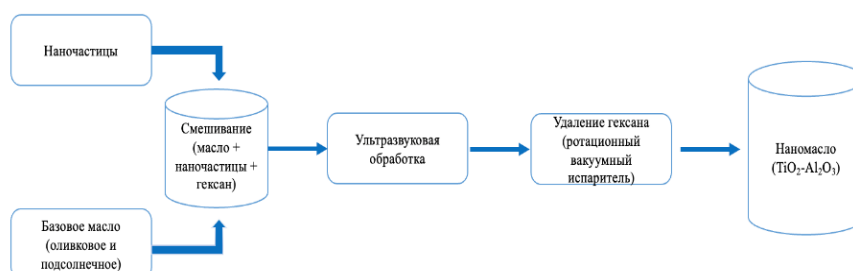


Рисунок 1 – Схема приготовления наномасел $\text{TiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ на основе оливкового и подсолнечного масел

Первичное диспергирование проводили с использованием ультразвукового гомогенизатора Scientz JY92-IIDN (максимальная мощность до 900 Вт, частота 20 кГц) в импульсном режиме. Время ультразвуковой обработки составляло 30 мин. После получения устойчивой суспензии гексан удаляли на ротационном вакуумном испарителе до постоянной массы образца. Полученные наномасла выдерживали в герметичной таре при комнатной температуре перед проведением измерений.

Теплопроводность (λ) измеряли в диапазоне 20-50 °С (293-323 К) с использованием анализатора теплофизических свойств TEMPOS [8]. Кинематическую вязкость (ν) определяли методом капиллярной вискозиметрии с использованием стеклянного вискозиметра ВПЖ-2 при термостатировании образцов в диапазоне 20-50 °С.

Кинематическую вязкость рассчитывали по уравнению [9]:

$$\nu = k \cdot t, \quad (1)$$

где ν – кинематическая вязкость, мм²/с (сSt);

K – постоянная вискозиметра, мм²/с²;

t – время истечения, с.

Результаты и обсуждение

На рисунке 2 представлены температурные зависимости кинематической вязкости $\nu(T)$ для базовых масел и наномасел $\text{TiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$. Для обоих базовых масел наблюдается типичное снижение вязкости при повышении температуры: в диапазоне 293-323 К ν уменьшается с 62 до 26 мм²/с для подсолнечного масла и с 75 до 32 мм²/с для оливкового масла. Введение гибридной дисперсной фазы приводит к увеличению ν во всем диапазоне температур, при этом относительное увеличение составляет 17,5% по сравнению с соответствующим базовым маслом.

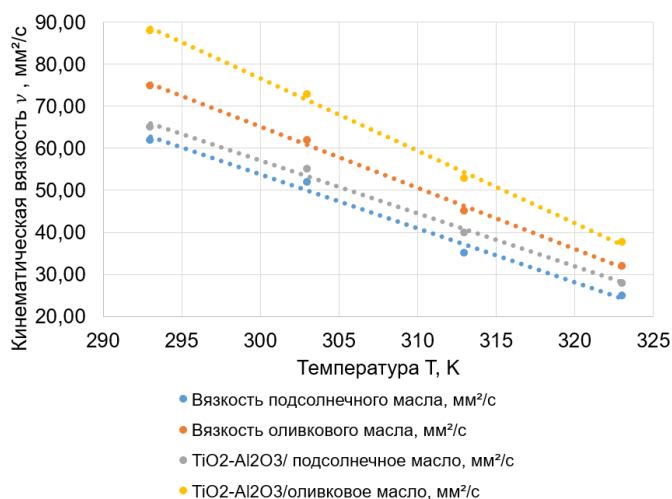


Рисунок 2 – Температурные зависимости кинематической вязкости $\nu(T)$ для базовых масел и наномасел $\text{TiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$

Рост кинематической вязкости наномасел при введении гибридных наночастиц $\text{TiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ может быть объяснён несколькими физическими механизмами. Во-первых, наличие наночастиц приводит к увеличению межчастичных взаимодействий в жидкости и формированию структурированных слоев жидкости вокруг поверхности частиц. Эти слои обладают более высокой эффективной вязкостью по сравнению с объемной жидкостью. Во-вторых, возможная частичная агрегация наночастиц увеличивает эффективный гидродинамический размер дисперсных структур, что дополнительно повышает сопротивление течению. В совокупности эти факторы приводят к увеличению кинематической вязкости наномасел по сравнению с базовыми жидкостями.

Для количественного описания экспериментальных данных выполнена линейная аппроксимация вида:

$$\nu(T) = aT + b, \quad (2)$$

где ν – кинематическая вязкость, мм²/с;

T – температура, К;

a – температурный коэффициент,

b – свободный член.

Точность аппроксимации оценивалась коэффициентом детерминации R^2 . Для всех исследованных жидкостей значения R^2 превышали 0,98, что свидетельствует о высокой степени соответствия линейной модели экспериментальным данным. Выбор линейной зависимости обусловлен тем, что в исследованном температурном интервале (293-323 К) экспериментальные данные демонстрируют практически линейный характер изменения теплофизических свойств, что подтверждается высокими значениями коэффициента детерминации.

Для всех жидкостей получены отрицательные значения a , что указывает на монотонное снижение ν при повышении температуры в диапазоне 293-323 К.

Аппроксимационные зависимости для базовых масел имеют вид:

$$\nu_{\text{подс}}(T) = -1,28T + 437,74 \quad (3)$$

$$\nu_{\text{олив}}(T) = -1,46T + 503,18 \quad (4)$$

Для наномасел с гибридной дисперсной фазой дисперсной фазой $\text{TiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ (2 vol.%) получены уравнения:

$$\nu_{\text{TiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3/\text{подс}}(T) = -1,26T + 435,08 \quad (5)$$

$$\nu_{\text{TiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3/\text{олив}}(T) = -1,7155T + 591,24 \quad (6)$$

Сопоставление коэффициентов a показывает, что скорость уменьшения вязкости с температурой лежит в пределах 1,26-1,72 мм²/с на 1 К, наиболее выраженная температурная зависимость характерна для гибрида $\text{TiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ /оливковое масло ($a=-1,7155$).

Значения свободного члена b определяют общий показатель ν : максимальные значения во всём рассматриваемом интервале соответствуют наномаслу на основе оливкового масла ($b=591,24$), тогда как минимальные – базовому подсолнечному маслу ($b=437,74$). Следовательно, введение $\text{TiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ в наибольшей степени повышает вязкость для оливковой основы и одновременно усиливает температурную чувствительность $\nu(T)$, что следует учитывать при оценке гидравлических потерь и выборе состава наномасла.

На рисунке 3 приведены зависимости теплопроводности $\lambda(T)$. В рассматриваемом диапазоне температур теплопроводность базовых масел изменяется слабо и демонстрирует умеренное снижение (4-5% при переходе от 293 к 323 К). Добавление $\text{TiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ повышает теплопроводность на 5% относительно базовой жидкости. Следовательно, при выборе состава наномасла необходимо учитывать следующие условия: небольшой выигрыш в λ сопровождается заметным ростом ν , что потенциально увеличивает затраты на перекачку и снижает эффективность конвективного теплообмена при заданном расходе.

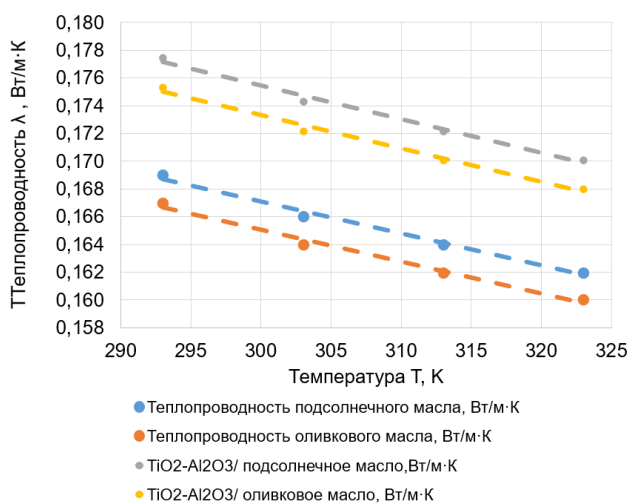


Рисунок 3 – Теплопроводность $\lambda(T)$ базовых масел и наномасел $\text{TiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ (2 vol.%)

Повышение теплопроводности наномасел при добавлении гибридных наночастиц $\text{TiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ связано с несколькими механизмами теплопереноса. Наночастицы оксидов металлов обладают более высокой теплопроводностью по сравнению с растительными

маслами, что приводит к формированию дополнительных путей теплопереноса в дисперсной системе. Кроме того, движение наночастиц в жидкости может вызывать локальную микроконвекцию, способствующую усилению теплопереноса. В результате совокупного действия этих механизмов наблюдается увеличение эффективной теплопроводности наномасел.

Для количественного описания выявленной температурной зависимости выполнена линейная аппроксимация экспериментальных данных в виде:

$$\nu(T) = aT + b, \quad (7)$$

где T – температура, К;

λ – теплопроводность, Вт/(м·К).

Во всех данных получен одинаковый отрицательный температурный коэффициент $a = -2 \cdot 10^{-4}$ Вт/(м·К²), что соответствует снижению λ на $\Delta\lambda \approx 0,006$ Вт/(м·К) при нагреве от 293 до 323 К и подтверждает слабую температурную чувствительность теплопроводности в рассматриваемом интервале.

Аппроксимационные зависимости для базовых масел имеют вид:

$$\lambda_{\text{подс}}(T) = -0,0002T + 0,2361 \quad (8)$$

$$\lambda_{\text{олив}}(T) = -0,0002T + 0,2341 \quad (9)$$

Для наномасел с гибридной дисперсной фазой $\text{TiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ (2 vol.%) получены уравнения:

$$\lambda_{\text{TiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3/\text{подс}}(T) = -0,0002T + 0,2479 \quad (10)$$

$$\lambda_{\text{TiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3/\text{олив}}(T) = -0,0002T + 0,2458 \quad (11)$$

Сопоставление свободных членов b показывает, что введение $\text{TiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ приводит преимущественно к вертикальному смещению зависимостей $\lambda(T)$ вверх при сохранении характера температурной зависимости: для подсолнечного масла b увеличивается с 0,2361 до 0,2479, для оливкового – с 0,2341 до 0,2458. Следовательно, влияние наночастиц проявляется главным образом в повышении уровня теплопроводности в пределах рассматриваемого диапазона температур, тогда как температурная производная $d\lambda/dT$ остаётся практически неизменной.

Заключение

1. Экспериментально определены температурные зависимости теплопроводности и кинематической вязкости для подсолнечного и оливкового масел, а также для наномодифицированных составов с гибридной дисперсной фазой $\text{TiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ при суммарной концентрации 2 vol.% в интервале 293-323 К.

2. В рассматриваемом диапазоне температур теплопроводность базовых масел изменяется слабо и демонстрирует умеренное снижение при нагреве. Добавление гибридных наночастиц $\text{TiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ приводит к повышению теплопроводности наномасел примерно на 5% по сравнению с соответствующими базовыми маслами во всём исследованном температурном интервале.

3. Кинематическая вязкость для всех образцов монотонно уменьшается с ростом температуры в диапазоне 293-323 К. Вместе с тем введение $\text{TiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ сопровождается заметным ростом вязкости: для наномасел увеличение кинематической вязкости составляет 17,5% относительно базовых масел при сохранении выраженного температурного снижения.

4. Полученные результаты показывают, что при практическом использовании наномасел важно учитывать баланс между ростом теплопроводности и увеличением вязкостных потерь. Небольшое повышение теплопроводности может сопровождаться ростом потерь давления при перекачке и, как следствие, уменьшением эффективности конвективного теплообмена при заданном расходе. В дальнейшем исследования следует направить на подбор оптимального состава гибридной дисперсной фазы и повышение устойчивости дисперсии, чтобы улучшить соотношение между усилением теплопереноса и увеличением вязкости.

Список литературы

1. Thermal Conductivity Characterization of High Oleic Vegetable Oils Based Hybrid Nanofluids Formulated Using GnP, TiO₂, MoS₂, Al₂O₃ Nanoparticles for MQL Machining / A.C. Okafor et al // Int J Thermophys. – 2024. – № 45. – P. 169. <https://doi.org/10.1007/s10765-024-03472-7>.
2. Thermophysical Properties and Heat Transfer Performance of Novel Dry-Ice-Based Sustainable Hybrid Lubri-Coolant / M. Jamil et al // Sustainability. – 2022. – № 14(4). – P. 2430. <https://doi.org/10.3390/su14042430>.
3. Characteristics of Hybrid Nanolubricants for MQL Cooling Lubrication Machining Application / S.K. Lim et al // Lubricants. – 2022. – № 10(12). – P. 350. <https://doi.org/10.3390/lubricants10120350>.
4. Thermal Conductivity Characterization of Nanofluids Formulated Using High Oleic Vegetable Oils and Gnp, Tio₂, Mos₂, Al₂o₃ Nanoparticles for Mql Machining / O.A.C. Valiev// Available at SSRN: <https://ssrn.com/abstract=5049062> or <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.5049062>.
5. 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>.
6. Thermal performance and viscosity of biologically produced silver/coconut oil nanofluids / M.M. Sarafraz et al // Chemical and Biochemical Engineering Quarterly. – 2016. – № 30(4). – P. 489-500. <https://doi.org/10.15255/CABEQ.2015.2203>.
7. Experimental study on NOX formation characteristics in flue gas recirculation combustion process of S-CO₂ coal-fired boiler / N. Li et al // Combustion Science and Technology. – 2024. – T. 196, № 18. – R. 5048-5063.
8. Jyothish P. Experimental investigation study on enhancing the thermal and rheological properties of sunflower vegetable oil with ZnTiO₃, BN, CuO nanofluid for machining of Inconel-718 under minimum quantity lubrication (MQL) / P. Jyothish, V. Vasu, D. Kashinath // Materials Today: Proceedings. – 2022. – № 59. – P. 1599-1607. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.03.147>.
9. TEMPOS Manual. METER Group, 2020. (ASTM D5334, IEEE 442; transient line heat source method).
10. Ranjbarzadeh R. Experimental Study of Thermal Properties and Dynamic Viscosity of Graphene Oxide/Oil Nano-Lubricant / R. Ranjbarzadeh, R. Chaabane // Energies. – 2021. – № 14(10). – P. 2886. <https://doi.org/10.3390/en14102886>.

Сведения о финансировании

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

А.Б. Касымов, Т.Н. Умыржан*, А.А. Бектемисов, Ж.Қ. Акишов, Д.Н. Нургалиев

Шәкәрім университеті,

071412, Қазақстан Республикасы, Семей қаласы, Глинка көшесі, 20А

*e-mail: timirlan-95@mail.ru

TiO₂-Al₂O₃ ГИБРИДТІ НАНОБӨЛШЕКТЕРІНІҢ ӨСІМДІК МАЙЛАРЫНЫҢ ЖЫЛУФИЗИКАЛЫҚ ҚАСИЕТТЕРІНЕ ӨСЕРІ

Өсімдік майлары наномайлар үшін перспективалы базалық сұйықтықтар ретінде қарастырылады, алайда олардың практикалық қолданылуы жылуөткізгіштіктің артуы мен тұтқырлықтың шығындардың өсуі арасындағы тепе-теңдік шартымен айқындалады. Бұл жұмыста зәйтүн және күнбағыс майлары негізіндегі наномайлардың жылуөткізгіштігі $\lambda(T)$ мен кинематикалық тұтқырлығына $\nu(T)$ TiO₂-Al₂O₃ гибриді дисперстік фазасының әсері эксперименттік түрде зерттелді. Наномайлар қатты фазаның жиынтық концентрациясы 2 vol.% болған жағдайда екісатылы әдіспен, ультрадыбыстық гомогенизацияны қолдана отырып дайындалды; жылуөткізгіштік TEMPOS анализаторымен өлшенді, ал кинематикалық тұтқырлық 20-50 °C (293-323 K) температура диапазонында капиллярлық вискозиметрия (ВПЖ-2) әдісімен анықталды.

Негізгі майлар үшін ν температура артқан сайын заңды түрде төмендейтіні анықталды, ал TiO₂-Al₂O₃ енгізу температуралардың бүкіл диапазонында сәйкес базалық майлармен салыстырғанда кинематикалық тұтқырлықтың 17,5%-ға артуына әкеледі. Негізгі майлардың жылуөткізгіштігі әлсіз өзгереді және қыздырғанда қалыпты төмендеу үрдісін көрсетеді, ал TiO₂-Al₂O₃ қоспасын қосу λ мәнін 5%-ға арттырады. Алынған $\lambda(T)$ және $\nu(T)$ тәуелділіктері жылуалмасуды

күшейту мен гидравликалық шығындардың өсуі арасындағы тепе-теңдікті ескере отырып, наномай құрамын таңдауды негіздеуде пайдаланылуы мүмкін.

Түйінді сөздер: өсімдік майлары; наномай; гибриді нанобөлшектер; TiO_2 ; Al_2O_3 ; жылуфизикалық қасиеттер; температуралық тәуелділік.

A.B. Kassymov, T.N. Umyrzhan*, A.A. Bektemissov, Z.K. Akishov, D.N. Nurgaliyev

Shakarim University,
071412, Republic of Kazakhstan, Semey, 20A Glinka St.

*e-mail: timirlan-95@mail.ru

EFFECT OF HYBRID $\text{TiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ NANOPARTICLES ON THE THERMOPHYSICAL PROPERTIES OF VEGETABLE OILS

Vegetable oils are considered promising base fluids for nanolubricants; however, their practical application is governed by the trade-off between enhanced thermal conductivity and increased viscous losses. In this work, the effect of a hybrid dispersed phase $\text{TiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ on the thermal conductivity $\lambda(T)$ and kinematic viscosity $\nu(T)$ of nanolubricants based on olive and sunflower oils was experimentally investigated. The nanolubricants were prepared by a two-step method at a total solid-phase concentration of 2 vol.% with ultrasonic homogenization; thermal conductivity was measured using a TEMPOS analyzer, and kinematic viscosity was determined by capillary viscometry (VPZh-2) over the temperature range of 20-50°C (293-323 K).

It was found that for the base oils, ν decreases monotonically with increasing temperature, whereas the addition of $\text{TiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ increases the kinematic viscosity by 17,5% relative to the corresponding base oils across the entire temperature range. The thermal conductivity of the base oils varies only slightly and exhibits a moderate decrease upon heating, while the incorporation of $\text{TiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ increases λ by 5%. The obtained $\lambda(T)$ and $\nu(T)$ relationships can be used to substantiate the selection of nanolubricant composition by accounting for the balance between heat-transfer enhancement and the rise in hydraulic losses.

Key words: vegetable oils; nanolubricant; hybrid nanoparticles; TiO_2 ; Al_2O_3 ; thermophysical properties; temperature dependence.

Сведения об авторах

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>.

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>.

Жандос Қайрбекұлы Акишов – докторант образовательной программы 8D05302-«Техническая физика» кафедры «Техническая физика и теплоэнергетика», Шәкәрім университет, Республика Казахстан; e-mail: zhandosakishov@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-0205-6269>.

Данияр Нуржанович Нургалиев – старший преподаватель кафедры «Техническая физика и теплоэнергетика», Шәкәрім Университет, Республика Казахстан; e-mail: daniarsemei@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-1650-1077>.

Авторлар туралы мәліметтер

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>.

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>.

Жандос Қайрбекұлы Акишов – «Техникалық физика және жылу энергетикасы» кафедрасының 8D05302-«Техникалық физика» білім беру бағдарламасының докторанты, Шәкәрім университеті, Қазақстан Республикасы; e-mail: zhandosakishov@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-0205-6269>.

Данияр Нуржанович Нурғалиев – «Техникалық физика және жылуэнергетикасы» кафедрасының аға оқытушысы, Шәкәрім университеті, Қазақстан Республикасы; e-mail: daniarsemei@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-1650-1077>.

Information about the authors

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 Umyrzhhan* – 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>.

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>.

Zhandos Kairbekuly Akishov – 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: zhandosakishov@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-0205-6269>.

Daniyar Nurjanovich Nurgaliev – senior lecturer, Department of Technical Physics and Heat Power Engineering, Shakarim University, Republic of Kazakhstan; e-mail: daniarsemei@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-1650-1077>.

Поступила в редакцию 25.01.2026

Поступила после доработки 10.03.2026

Принята к публикации 10.03.2026

[https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-1\(21\)-63](https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-1(21)-63)

MPHTI: 31.17.15



**Д.А. Әскержанов^{1,*}, Р.К. Кусаинов^{1,2}, А.Ж. Жасұлан^{1,2}, К.Д. Орманбеков¹,
А.Б. Шынарбек¹**

¹Шәкәрім университеті, Инжиниринг орталығы,
071412, Қазақстан Республикасы, Семей қ., Глинка, 20 А

²Шәкәрім университеті,
071412, Қазақстан Республикасы, Семей қ., Глинка, 20 А

*e-mail: dumanaskerzhanov541@gmail.com.

HVOF ӘДІСІМЕН АЛЫНҒАН Cr_3C_2 –NiCr ЖАБЫНДАРЫНЫҢ ҚҰРЫЛЫМДЫҚ, ТРИБОЛОГИЯЛЫҚ ЖӘНЕ КОРРОЗИЯЛЫҚ ҚАСИЕТТЕРІ

Аңдатпа: Бұл зерттеу жұмысы жылу электр орталығының қазандық құбырларын жасауға кеңінен қолданылатын 12Х1МФ тот баспайтын болаттан қызмет мерзімін арттыруға бағытталған. Жоғары жылдамдықты оттек-отын жалынды бүрку (HVOF) әдісімен Cr_3C_2 –NiCr жабындары алынып, олардың құрылымдық, фазалық, механикалық, трибологиялық және коррозиялық қасиеттері зерттелді. Болат үлгілерінің жабын төселетін беткі қабатын алдын ала 100°C және 200°C температурада қыздырудың жабынның микроструктуралық күйі мен қасиеттеріне әсері қыздырылмаған үлгілермен салыстырмалы түрде бағаланды. Жабындардың көлденең қимасын СЭМ талдау нәтижелері барлық режимдерде алынған жабындар біртекті құрылымға ие екенін көрсетті. Болат үлгілерін алдын ала қыздыру жабын мен төсеніш шекарасында тығыз қабаттың қалыптасуына себеп болады. Рентгендік дифракциялық талдау нәтижелері зерттелген жабындарда Cr_3C_2 –Ni жүйесінің фазалық тұрақтылығы сақталатынын көрсетті. Алынған нәтижелер бойынша 100°C температурада алдын ала қыздырылған үлгілер ең жоғарғы қасиеттер жиынтығын көрсетті: микроаттылықтың жоғары мәні (897,8 HV), беткі кедір-бұдырлықтың төмендеуі, тозу ізінің диаметрінің минималды мәні (712 мкм) және коррозия тоғының тығыздығының төмендеуі байқалды.