УДК 621.89.099
EDN: LQMJWE

С.Н. Иванчик, Д.А. Сибриков, Е.С. Губин
ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет водного транспорта», Новосибирск, Россия

ИЗУЧЕНИЕ ОСАЖДЕНИЯ ПРИСАДКИ СФЕРОИДИЗИРОВАННОГО КАРБИДА ВОЛЬФРАМА В МОТОРНОМ МАСЛЕ

Объект и цель научной работы. Объектом исследования является процесс гравитационного осаждения сфероидизированных частиц керамики на основе карбида вольфрама в моторном полусинтетическом масле. Цель – определение возможности и продолжительности нахождения указанных частиц во взвешенном состоянии в ходе проведения триботехнических испытаний моторного масла с образцами типа «ролик – колодка».

Материалы и методы. В работе применен метод теоретического исследования процесса осаждения сфероидизированных частиц карбида вольфрама в моторном масле. Математическая модель движения и перемешивания масла при вращении ролика может быть описана уравнениями Навье – Стокса, уравнением неразрывности и уравнениями движения твердой фазы. Оценка достоверности полученных результатов расчета проводится путем сравнения с экспериментально полученными данными.

Основные результаты. Из полученных в ходе экспериментов снимков видно, что во всех пробах, кроме последней, обнаруживаются частицы карбида вольфрама. Теоретические результаты подтверждаются результатами эксперимента.

Заключение. Математическая модель процесса удовлетворительно описывает процесс осаждения частиц в масле. При увеличении температуры масла время осаждения частиц, согласно расчетам, существенно сокращается. Также обнаружено, что осевшие частицы карбида вольфрама при перемешивании легко переходят во взвешенное состояние.

Ключевые слова: гравитационное осаждение частиц в масле, кинематическая вязкость масла, динамическая вязкость масла, частицы карбида вольфрама, моторное масло, гравитационные силы.

Авторы заявляют об отсутствии возможных конфликтов интересов.

UDC 621.89.099
EDN: LQMJWE

S.N. Ivanchik, D.A. Sibrikov, E.S. Gubin
Siberian State University of Water Transport, Novosibirsk, Russia

STUDY OF PRECIPITATION OF SPHEROIDIZED TUNGSTEN CARBIDE ADDITIVE IN MOTOR OIL

Object and purpose of research. The object of this study is the gravitational sedimentation of spheroidized tungsten carbide ceramic particles in semi-synthetic motor oil. The objective of the study is to determine the feasibility and duration of the ceramic particles' suspension during tribological testing of motor oil using roller-on-pad specimens.

Materials and methods. This paper presents the results of a theoretical study of the sedimentation process of spheroidized tungsten carbide particles in motor oil. A mathematical model of the oil's motion and mixing during roller rotation can be described using the Navier – Stokes equations, the continuity equation, and the equations of solid-phase motion. The reliability of the calculated results is assessed by comparison with experimental data.

Main results. From the images obtained during the experiments, it is clear that in all samples except the last one, particles of tungsten carbide were found, which confirms the theoretical data obtained.

Для цитирования: Иванчик С.Н., Сибриков Д.А., Губин Е.С. Изучение осаждения присадки сфероидизированного карбида вольфрама в моторном масле. Труды Крыловского государственного научного центра. 2026; 2(416): 125–136.

For citations: Ivanchik S.N., Sibrikov D.A., Gubin E.S. Study of precipitation of spheroidized tungsten carbide additive in motor oil. Transactions of the Krylov State Research Centre. 2026; 2(416): 125–136 (in Russian).

Conclusion. The mathematical model satisfactorily describes the particle sedimentation process in oil. According to calculations, the particle sedimentation time decreases significantly with increasing oil temperature. Furthermore, it was found that the settled tungsten carbide particles easily become suspended when stirred.
Keywords: gravitational sedimentation of particles in oil, kinematic viscosity of oil, dynamic viscosity of oil, tungsten carbide particles, motor oil, gravitational forces.
The authors declare no conflicts of interest.

Введение
Introduction

Один из путей увеличения срока службы и снижения износа машин и механизмов связан с применением смазочных материалов с более низкими значениями коэффициента трения, достигаемыми благодаря присадкам различной природы и структуры: наноматериалами [1], металлоплакирующими и металлокерамическими присадками [2] и т.д. [3–6].

В работе [7] приводятся результаты исследования влияния добавки к маслу сфероидизированных частиц карбида вольфрама на коэффициент трения скольжения. Обнаружено, что при добавлении в масло присадки частиц карбида вольфрама в количестве 5–6 % масс. при высокой нагрузке в паре трения «колодка – ролик» происходит заметное снижение коэффициента трения скольжения. Согласно схеме испытаний (рис. 1), смазывание трущихся поверхностей происходит за счет налипания масла на частично погруженный в емкость с исследуемым маслом вращающийся ролик.

Данная работа посвящена изучению вопросов:

- как долго частицы керамики будут находиться во взвешенном состоянии при гравитационном осаждении частиц керамики на основе карбида вольфрама в моторном масле при рабочей температуре и температуре окружающей среды;

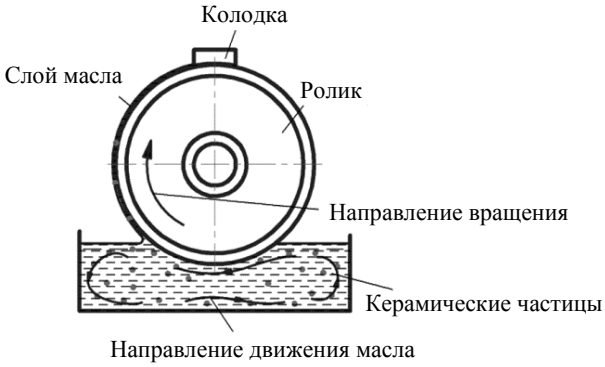


Рис. 1. Схема испытаний [7]
Fig. 1. Test scheme [7]

- насколько легко частицы керамики из осадка переходят во взвешенное состояние при перемешивании масла.

Материалы и методы испытания
Materials and methods of testing

Изучение осаждения частиц производится теоретически на основе рассмотрения сил, действующих на частицу во взвешенном состоянии. Оценка полученных теоретических результатов, выполненных с учетом ряда допущений, производится путем сопоставления с результатами эксперимента. Рассмотрение задачи перемешивания частиц производится экспериментально.

При рассмотрении данной задачи приняты следующие допущения:

- известно, что к закону Стокса, учитывающему сопротивление среды движению частицы, есть поправки, учитывающие форму частиц. В нашем случае частицы имеют сферическую форму, поэтому поправки «на форму» не учитываются. Частицы керамики имеют шероховатую поверхность [7]. В связи с отсутствием данных о влиянии шероховатости поверхности частицы на силу Стокса и малые скорости осаждения в данном исследовании принято, что частицы имеют сферическую гладкую поверхность;
- процесс «сфероидизации» частиц керамики связан с их расплавлением и последующим охлаждением. При этом в частицах возможно появление открытой и закрытой пористости, что должно привести к уменьшению их средней плотности. Однако в связи с отсутствием данных о плотности сфероидизированных частиц принимается, что частицы плотные [8];
- учитывая форму емкости для масла, в данном исследовании перемешивание масла осуществлялось ручной мешалкой круговыми движениями, захватывая верхние, затем нижние слои. Продолжительность перемешивания масла составляла 1 мин. после визуального исчезновения осадка. Предполагается, что при перемешивании частицы движутся со скоростью потока

масла вслед за мешалкой. После прекращения перемешивания колебания свободной поверхности масла прекращались, что свидетельствует о существенном снижении скорости движения масла и, предположительно, частиц керамики. Начинался процесс гравитационного осаждения частиц. В связи с этим сделано допущение, что частицы карбида вольфрама распределены в масле равномерно, а их начальная вертикальная скорость равна нулю.

Теоретические расчеты времени осаждения выполнены для размеров частиц 15 и 45 мкм. Эксперимент заключался в исследовании проб масла с помощью микроскопа. В заключение выполнен анализ полученных теоретических и экспериментальных данных.

Перечень применяемого в исследовании лабораторного оборудования, с указанием его характеристик, приведен ниже.

Для расчета скорости осаждения частиц необходимо значение динамической вязкости масла при температуре проведения исследования. Значения динамической вязкости при разных температурах были определены расчетным способом, учитывая экспериментально полученные значения кинематической вязкости и плотности. Оценка полученных экспериментальных значений проводилась сопоставлением полученных данных со значениями кинематической вязкости из открытых источников для используемого масла при стандартных температурах (40 °С, 100 °С).

Кинематическая вязкость масла определялась с помощью вискозиметра (аппарата для автоматического определения условной вязкости нефтепродуктов) «Линтел ВУН-20» (рис. 2).

В диапазоне температур 20–80 °С в качестве рабочей жидкости использовалась вода. Основные технические характеристики вискозиметра приведены в табл. 1.

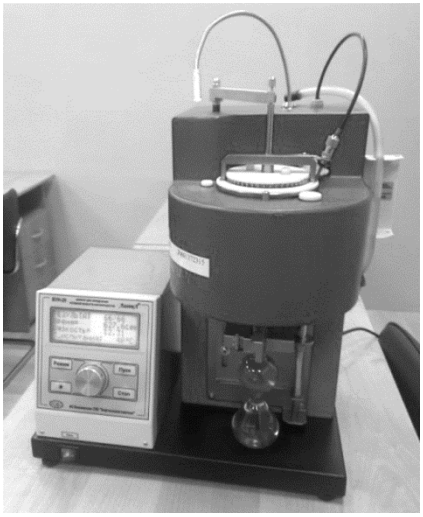


Рис. 2. Аппарат для автоматического определения условной вязкости нефтепродуктов «Линтел ВУН-20»

Fig. 2. Apparatus for automatic determination of the relative viscosity of petroleum products Lintel VUN-20

Для измерения плотности масла использовался стеклянный ареометр АНТ-2 830-910, предназначенный для измерения плотности нефти и масел в соответствии с ГОСТ 18481-81.

Подготовка проб масла для измерения плотности при температурах от +20 до +80 °С проводилась с использованием водяной бани ЛОИП LT-840 (рис. 3). Основные характеристики приведены в табл. 2.

Температура контролировалась с помощью ртутных стеклянных лабораторных термометров типа ТЛ-4 по ТУ 25-2021.003-88 с учетом требований к проведению измерений по ГОСТ 3900-2022 «Нефть и нефтепродукты. Методы определения плотности».

Для проведения исследования использовался порошок (5 % масс. от массы масла в емкости),

Таблица 1. Основные характеристики вискозиметра «Линтел ВУН-20» [9]

Table 1. Main parameters of viscosimeter Lintel VUN-20 [9]

Показатель	Значение
Точность измерения температуры ванны, °С	±0,5
Точность измерения температуры продукта, °С	±0,5
Точность поддержания температуры ванны, °С	±0,25
Точность поддержания температуры продукта, °С	±0,5
Цена наименьшего деления выдаваемого результата определения, °Е	0,01

Таблица 2. Основные характеристики водяной бани ЛОИП LT-840 [10]

Table 2 Main parameters of water bath LOIP LT-840 [10]

Показатель	Значение
Рабочая жидкость	Вода
Максимальная температура при использовании воды в качестве рабочей жидкости в ванне, °С	+80
Точность поддержания температуры (не более), °С	±0,1
Количество рабочих мест	6
Объем ванны, л	12

Рис. 3. Водяная баня ЛОИП LT-840

Fig. 3. Water bath LOIP LT-840

состоящий из сфероидизированных частиц карбида вольфрама с добавками кобальта и хрома: WC-10Co-4Cr (WC – 86 %; Co – 10 %; Cr – 4 %). Размер частиц 0,015–0,045 мм.

Применялась стеклянная емкость прямоугольного сечения (рис. 4*а*) с полусинтетическим моторным маслом SAE 10W-40. Для равномерного распределения порошка по объему емкости масло было перемешано. Затем через равные промежутки времени проводились отборы проб т.н. пипеточным способом.

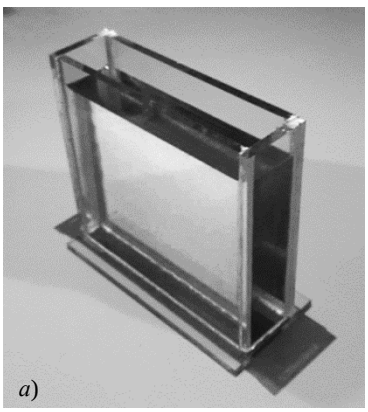
Наиболее распространенными методами седиментационного анализа являются:

- измерение плотности взвеси осадка в жидкости в процессе оседания дисперсной фазы;
- взвешивание массы осадка, накопленного в чашке весов (весовой метод);
- определение концентрации дисперсной фазы на определенной глубине (пипеточный способ).

Выбор последнего метода связан с тем, что он прост в реализации, обеспечивает высокую точность и хорошую воспроизводимость результатов, применим при малых концентрациях дисперсной фазы [11].

В предположении, что частицы порошка распределены равномерно в объеме масла, производился отбор проб с помощью шприца объемом 5 мл. Схема отбора проб приведена на рис. 4*б*.

Пробы были изучены с помощью микроскопа «Микромед Полар – 1», характеристики



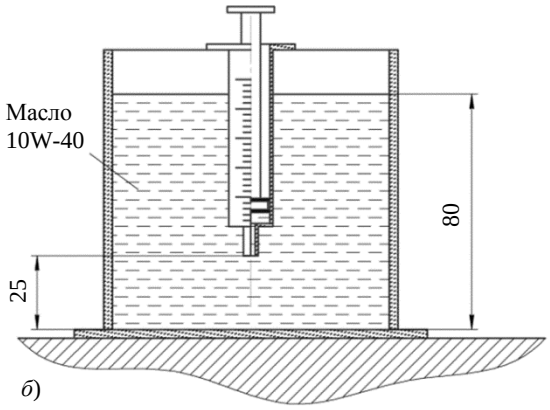


Рис. 4. Оборудование для эксперимента:
а) емкость для масла;
б) схема забора проб

Fig. 4. Experimental equipment:
a) oil container;
b) sampling diagram

Таблица 3. Основные характеристики микроскопа «Микромед Полар – 1»

Table 3. Main parameters of Micromed Polar-1 microscope

Видимое увеличение микроскопа, крат	50–500
Увеличение планахроматических объективов, крат	5, 10, 20, 50
Увеличение визуальной насадки	1
Видимое увеличение широкопольных окуляров	10
Методы исследования	в проходящем (обыкновенном) свете в светлом поле
	в отраженном (поляризованном) свете – ортоскопическое наблюдение

которого приведены в табл. 3. Отбор проб проводился до тех пор, пока в них обнаруживались частицы порошка.

Математическая модель

Mathematical model

Расчетная схема сил, действующих на частицу, находящуюся в жидкости, приведена на рис. 5.

На частицу будут действовать: сила тяжести $F_т$, Архимедова сила $F_а$ и сила сопротивления движению $F_с$. Результирующая сила, действующая на частицу, определяется уравнением

$$F = ma = F_т - F_а - F_с. \quad (1)$$

При этом сила тяжести сферической частицы может быть определена по формуле

$$F_т = mg = \frac{4}{3}\pi R^3 \rho_ш g, \quad (2)$$

где R – радиус частицы, м; $\rho_ш$ – плотность материала частицы, кг/м^3; g – ускорение свободного падения, 9,81 м/с^2; m – масса частицы, кг.

Архимедова сила

$$F_а = \rho_ж g V_ш = \rho_ж g \frac{4}{3}\pi R^3, \quad (3)$$

где $\rho_ж$ – плотность масла, кг/м^3; $V_ш$ – объем частицы, м^3.

При малых скоростях осаждения частиц режим обтекания частицы можно считать ламинарным. В случае, когда число Рейнольдса меньше единицы (Re << 1) [12], сила сопротивления движению частицы может быть определена по формуле Стокса [13, 14].

$$F_с = 6\pi v R \mu, \quad (4)$$

где v – скорость осаждения частицы, м/с; μ – коэффициент динамической вязкости масла, Па·с.

Учитывая, что ускорение – это $\frac{dv}{dt}$, выражение (1) принимает вид

$$m\frac{dv}{dt} = \frac{4}{3}\pi R^3 \rho_ш g - \rho_ж g \frac{4}{3}\pi R^3 - 6\pi v R \mu. \quad (5)$$

Решением дифференциального уравнения относительно скорости будет являться выражение [13, 14]

$$v = v_{уст}(1 - e^{-at}), \quad (6)$$

где $v_{уст}$ – установившаяся (предельная) скорость оседания частицы, м/с; a – коэффициент, определяемый по формуле (7):

$$a = \frac{9}{2}\frac{\mu}{R^2 \rho_ш}. \quad (7)$$

Установившаяся скорость может быть определена по формуле

$$v_{уст} = \frac{2}{9}\frac{gR^2(\rho_ш - \rho_ж)}{\mu}. \quad (8)$$

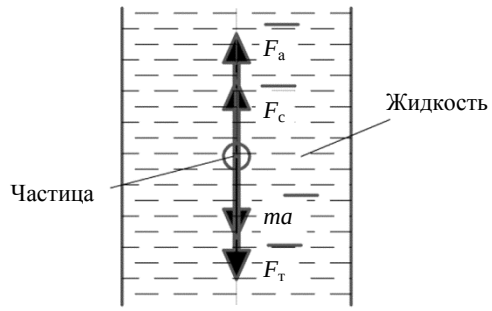


Рис. 5. Расчетная схема сил, действующих на погруженную частицу

Fig. 5. Calculation scheme of forces acting on a submerged particle

Уравнение перемещения частицы можно получить интегрированием уравнения (6) с пределами интегрирования от 0 до t

$$S = \int_0^t v dt = \int_0^t v_{уст}(1 - e^{-at}) dt.$$

После интегрирования, подстановки пределов интегрирования и преобразования получим выражение

$$S = \frac{a v_{уст} t e^{at} + v_{уст}}{a e^{at}} - \frac{v_{уст}}{a} = v_{уст} t + \frac{v_{уст}}{a e^{at}} - \frac{v_{уст}}{a}.$$

Поскольку

$$\lim_{t \to \infty} \frac{v_{уст}}{a e^{at}} = 0,$$

то уравнение для определения перемещения частицы в условиях рассматриваемой задачи принимает вид линейной функции

$$S = v_{уст} t - \frac{v_{уст}}{a}. \quad (9)$$

По графику функции $S = f(t)$ время осаждения частиц определяется точкой пересечения графика с ординатой, равной высоте слоя масла в емкости.

Анализ основных результатов измерений

Analysis of main measurement results

Для расчета времени осаждения частиц требуется знать значения динамической вязкости масла при температурах от +20 до +80 °С. Динамическая вязкость (Па·с) может быть определена по формуле

$$\mu = \nu \rho, \quad (10)$$

где ν – кинематическая вязкость, м^2/с; ρ – плотность масла, кг/м^3.

Определение кинематической вязкости проводилось с помощью вискозиметра «Линтел ВУН-20», измерение плотности – с помощью ареометра. Результаты измерения кинематической вязкости с учетом перевода ВУ в сСт [15] приведены в табл. 4 и на рис. 6*а*.

Таблица 4. Результаты измерения кинематической вязкости масла

Table 4. Measurement results: kinematic viscosity of oil

Температура T, °С	Кинематическая вязкость ν, °ВУ	Кинематическая вязкость ν, мм^2/с (сСт)
25	24,68	183
32	17,18	127
40	12,31	91
50	8,04	59
64	4,75	33

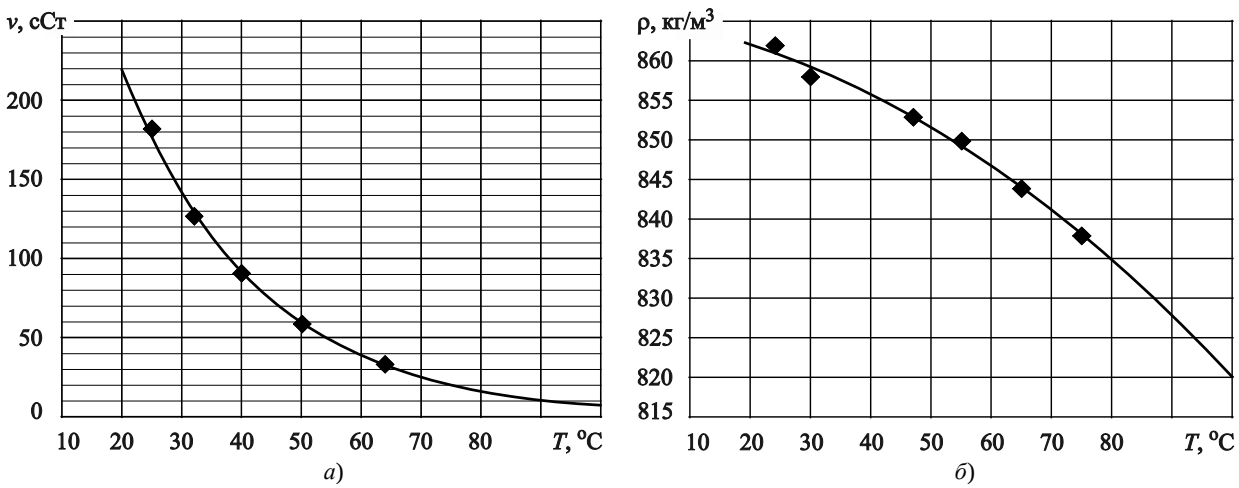


Рис. 6. Графики изменения кинематической вязкости (*а*) и плотности (*б*) от температуры для масла

Fig. 6. Graphs of changes in kinematic viscosity (*a*) and density (*b*) from temperature for oil

Результаты измерения плотности приведены в табл. 5 и на рис. 6*б*.

Результаты расчета динамической вязкости по формуле (10) приведены в табл. 6 и на рис. 7.

Расчеты времени осаждения частиц проведены при температуре 25 °С (температура проведения эксперимента) для граничных значений размеров частиц и для температуры 80 °С, соответствующей ориентировочным значениям температуры масла в смазочной системе двигателя [16, 17] и температуре в парах скольжения при проведении трибологических испытаний [7]. Плотность частиц карбида вольфрама принята $\rho_ш$ = 15 800 кг/м^3 [18]. Результаты расчетов приведены в табл. 7 и на рис. 8.

В соответствии со схемой рис. 4*б* отбор первой пробы проведен через 15 мин. после перемешивания масла в емкости, далее – каждые 15 мин. Фотографии проб масла, полученные с помощью микроскопа, представлены на рис. 9.

Из снимков видно, что во всех пробах, кроме 9*з*, обнаруживаются частицы карбида вольфрама. На рис. 9*з* в пробе масла не обнаружено ни одной частицы. Результаты расчетов подтверждают это предположение. Продлив график $S = f(t)$ (рис. 8) для мелких частиц до расстояния S = 80 мм (уровень масла в емкости), можно оценить время полного осаждения частиц.

Заключение

Conclusion

В результате проведенных вычислений и экспериментальных исследований можно сделать следующие выводы:

1. Получены значения динамической вязкости в диапазоне температур 20–100 °С для полусинтетического моторного масла 10W-40.

Таблица 5. Результаты измерения плотности масла

Table 5. Measurement results: density of oil

Температура *T*, °С	Плотность ρ, кг/м^3
24	862
30	858
47	853
55	850
65	844
75	838

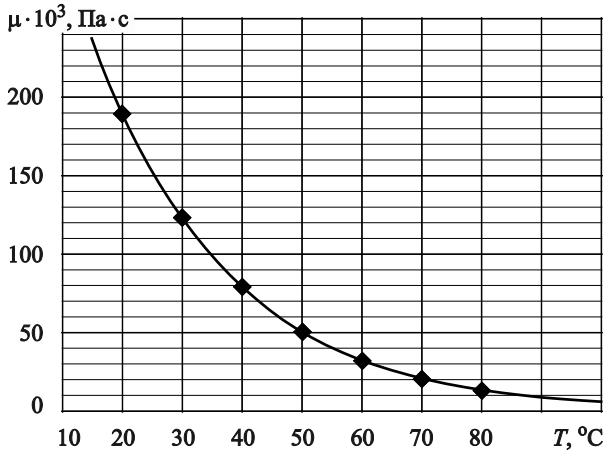


Рис. 7. График изменения динамической вязкости масла от температуры

Fig. 7. Graph of change in dynamic viscosity of oil depending on temperature

Таблица 6. Результаты расчета динамической вязкости масла

Table 6. Measurement results: density of oil

Температура *T*, °С	Кинематическая вязкость *ν*, мм^2/с (сСт)	Плотность ρ, кг/м^3	Динамическая вязкость μ·10^3, Па·с
20	220	862	189,6
30	144	859	123,7
40	92	856	78,8
50	60	852	51,1
60	38	847	32,2
70	25	841	21,0
80	16	835	13,4

Таблица 7. Результаты расчета времени осаждения частиц

Table 7. Calculation results: particle deposition time

Показатель	Результаты расчетов			
Диаметр частиц карбида вольфрама *D*, мм	0,015	0,045	0,015	0,045
Температура масла *T*, °C	25	25	80	80
Динамическая вязкость масла $\mu \cdot 10^3$, Па·с	155	155	13,8	13,8
Установившая скорость частицы $v_{уст}$, мм/с	0,0118	0,106	0,133	1,20
Число Рейнольдса Re	$9{,}84 \cdot 10^{-7}$	$2{,}66 \cdot 10^{-5}$	$1{,}25 \cdot 10^{-4}$	$3{,}67 \cdot 10^{-3}$
Максимальное время осаждения частиц до места отбора пробы, с (мин.)	4650 (77,5)	500 (8,3)	420 (7)	60 (1)
Максимальное время осаждения частиц на дно емкости, с (мин.)	6800 (113,3)	770 (12,8)	600 (10)	80 (1,3)

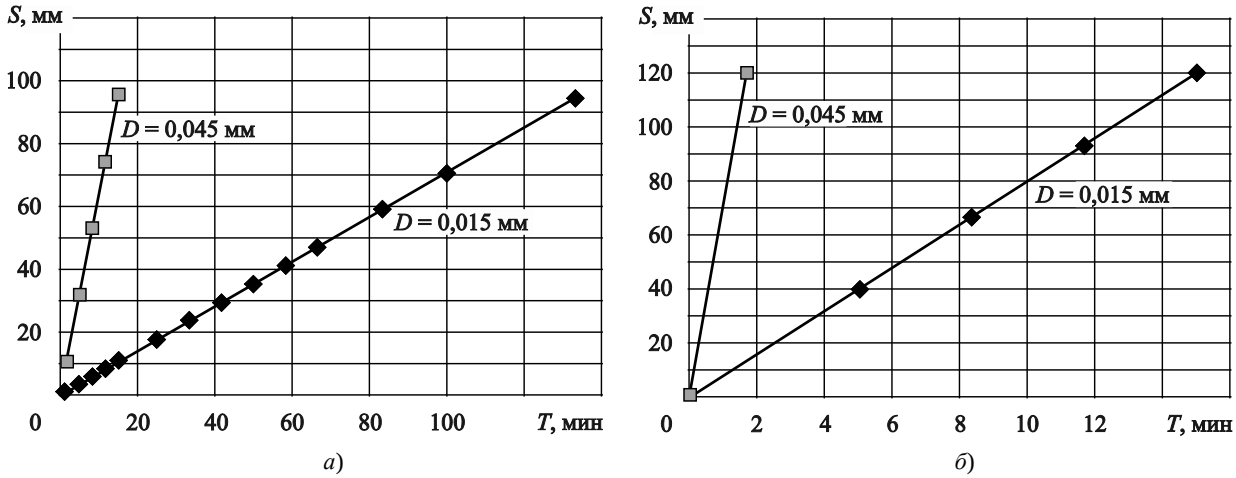
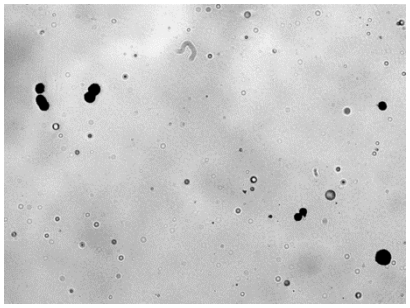


Рис. 8. Результаты расчета перемещения частиц карбида вольфрама в масле: *а*) при температуре 25 °C; *б*) при температуре 80 °C

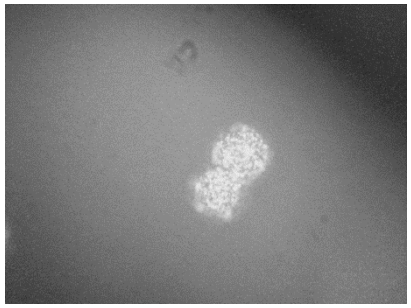
Fig. 8. Calculation results for the movement of tungsten carbide particles in oil: *a*) at a temperature of 25 °C; *b*) at a temperature of 80 °C

2. Математическая модель процесса достаточно точно описывает процесс осаждения частиц карбида вольфрама в масле, что подтверждается результатами исследования. Расчетное время осаждения частиц до уровня забора масла при температуре исследования 25 °C в зависимости от размера частиц составило от 8,3 до 77,5 мин. При исследовании образцов масла с помощью микроскопа частицы керамики обнаруживались в пробах масла, взятых в течение часа после перемешивания.
3. Повышение температуры масла с 25 до 80 °C приводит к сокращению времени осаждения мелких частиц керамики с 113,3 до 10 мин., что связано со снижением вязкости масла.
4. При перемешивании осевшего порошка на дне емкости перед началом эксперимента частицы карбида вольфрама достаточно легко переходят во взвешенное состояние.

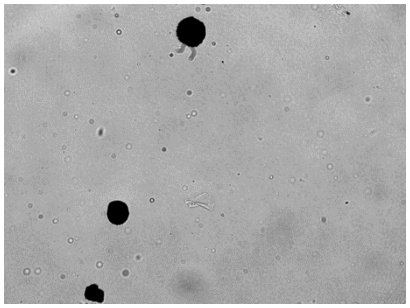
Из вышесказанного следует, что при движении масла, организуемом за счет вращения частично погруженного ролика, частицы керамики находятся во взвешенном состоянии и могут поступать вместе с маслом на поверхности ролика в пару трения «ролик – колодка».



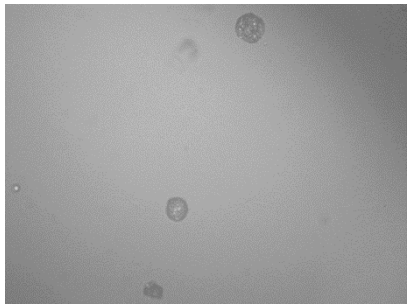
а) 200-кратное увеличение (проходящий свет)



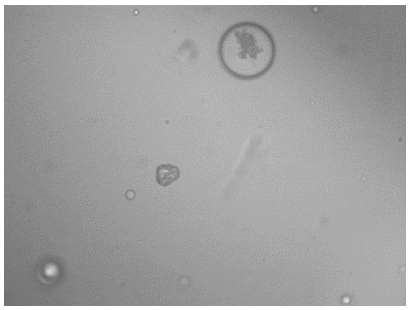
б) 500-кратное увеличение (отраженный свет)



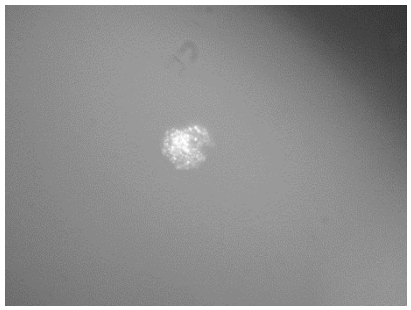
в) 200-кратное увеличение (проходящий свет)



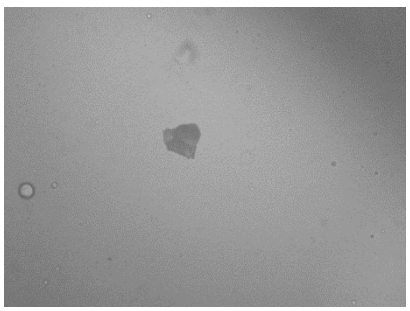
г) 200-кратное увеличение (отраженный свет)



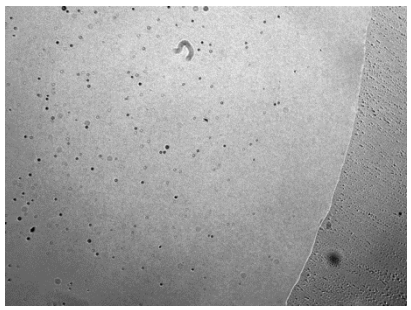
д) 200-кратное увеличение (отраженный свет)



е) 500-кратное увеличение (отраженный свет)



ж) 200-кратное увеличение (отраженный свет)



з) 50-кратное увеличение (проходящий свет)

Рис. 9. Изображения частиц в капле масла при выдержке: *а*), *б*) – 15 мин.; *в*), *г*) – 30 мин.; *д*), *е*) – 45 мин.; *ж*) – 60 мин.; *з*) – 75 мин. (частиц нет)

Fig. 9. Images of particles in a drop of oil during exposure: *a*), *b*) – 15 min.; *c*), *d*) – 30 min.; *d*), *f*) – 45 min.; *g*) – 60 min.; *h*) – 75 min. (no particles)

Список использованной литературы

1. *Ермаков С.Ф.* Влияние смазочных материалов и присадок на триботехнические характеристики твердых тел. Ч. 1. Пассивное управление трением // Трение и износ. 2012. Т. 33, № 1. С. 90–111.
2. *Киселев В.В., Зарубин В.П.* Повышение надежности трансмиссий пожарных автомобилей за счет улучшения триботехнических свойств смазочных материалов // Современные проблемы гражданской защиты. 2020. № 1(34). С. 31–37.
3. Повышение триботехнических характеристик пар трения зубчатых передач / *В.И. Мощенок, А.П. Любченко, Д.Б. Глушкова* [и др.] // Вестник Харьковского национального автомобильно-дорожного университета. 2007. № 38. С. 137–139.
4. Исследование состава поверхностной пленки, сформированной под действием добавки «Кластер-В» / *К.В. Сафонов, С.А. Шишурин, В.В. Сафонов, В.В. Остриков* // Проблемы экономичности и эксплуатации автотракторной техники : материалы XXXVI Международной научно-технической конференции им. В.В. Михайлова. Саратов : Вавиловский ун-т, 2023. С. 254–260.
5. Сравнительная оценка трибологических свойств нанодобавок к материалам, принадлежащим к классам реметализантов и ревитализантов / *В.В. Сафонов, В.В. Венскайтис, А.И. Фатькин* [и др.] // Проблемы экономичности и эксплуатации автотракторной техники : материалы XXXIV Международной научно-технической конференции им. В.В. Михайлова. Саратов : Амирит, 2021. С. 132–137.
6. Исследование эффективности использования слоистого модификатора трения в цилиндропоршневой группе судового дизельного двигателя / *И.Н. Гужвенко, В.А. Чанчиков, Н.В. Прямухина, Е.А. Стринжа* // Морские интеллектуальные технологии. 2018. № 3, ч. 1. С. 135–142.
7. Изучение влияния добавки мелкодисперсного порошка карбида вольфрама на антифрикционные свойства смазочных материалов / *Е.С. Губин, Д.А. Сибриков, С.В. Титов* [и др.] // Труды Крыловского государственного научного центра. 2024. № 2(408). С. 169–176.
8. *Чесноков А.Е., Смирнов А.В., Батраев И.С.* Влияние микроструктуры металлокерамических порошков на эксплуатационные характеристики газотермических покрытий // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2019. № 7. С. 74–81. DOI: 10.1134/S0207352819060040.
9. ЛинтеЛ ВУН-20. Аппарат автоматический для определения условной вязкости нефтепродуктов // БСКБ «Нефтехимавтоматика» : [сайт]. Уфа, 2025. URL: https://bashnxa.ru/catalog/kontrol_kachestva_topliv/341/ (дата обращения: 27.04.2026).
10. Водяная баня на старение LT-840 // Лабораторное оборудование и приборы : [сайт]. Санкт-Петербург, 2026. URL: https://loip.ru/catalog/laboratornoe-oborudovanie-proizvodstva-loip/priboryi-dlya-kontrolya-kachestva-nefteproduktov/loip-lt-840-vodyanaya-banya-na-starenie (дата обращения: 27.04.2026).
11. Разработка метода экспериментального определения скорости седиментации механических примесей в авиатопливе и исследование формы частиц наиболее критичного загрязнителя / *А.Н. Тимошенко, С.П. Урявин, А.Н. Козлов, И.С. Мельникова* // Научный вестник ГосНИИ ГА. 2013. № 3(314). С. 54–61.
12. *Михайлов А.С.* О двух поправках при вычислении скорости осаждения тонкодисперсного материала на основе закона Стокса // Геология и геофизика. 1968. Т. 9, № 4. С. 111–114.
13. *Хвостов А.А., Журавлев А.А., Рябинин Е.В.* Математическое описание поведения сферического тела в вязкой жидкости // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. 2015. Т. 3, № 5-1. С. 302–304. DOI 10.12737/14509.
14. *Хвостов А.А., Журавлев А.А.* Математическая модель свободного осаждения шарообразной частицы в вязкой жидкости // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. 2017. Т. 5, № 7-1. С. 219–222.
15. *Надежкин А.В., Даничкин В.Н.* Методы контроля качества топлив и смазочных материалов на судах. Владивосток : Морской гос. ун-т им. адм. Г.И. Невельского, 2022. 105 с.
16. *Пономарев В.А., Катин Р.С.* Теплотехнический контроль и методы диагностирования работы двигателей // Современное состояние и актуальные проблемы водного транспорта : сборник статей V Всероссийской научно-практической студенческой конференции. Казань : Казанский филиал ФГБОУ ВО «ВГУВТ», 2023. С. 138–152.
17. Гидродинамические и тепловые процессы в охладителе масла системы смазки дизельных двигателей: численное моделирование / *И.А. Попов, Ю.В. Жукова, А.Д. Чорный* [и др.] // Механика машин, механизмов и материалов. 2025. № 3(72). С. 5–17. DOI: 10.46864/1995-0470-2025-3-72-5-17.
18. Материал карбид вольфрама WC // Русплав : [сайт]. [Б. м.], 2017. URL: https://rusplav.ru/material-karbid-volframa-wc (дата обращения: 27.04.2026).

References

1. *Ermakov S.F.* Influence of lubricants and additives on the tribological characteristics of solids. Part 1. Passive

friction control // Friction and wear. 2012. Vol. 33, No. 1. P. 90–111 (*in Russian*).

2. *Kiselev V.V., Zarubin V.P.* Increasing the reliability of fire engine transmissions by improving the tribotechnical properties of lubricants // Modern problems of civil defense. 2020. No. 1(34). P. 31–37 (*in Russian*).
3. Improving the tribological characteristics of friction pairs of gear transmissions / *V.I. Moshchenok, A.P. Lyubchenko, D.B. Glushkova* [et al.] // Bulletin of the Kharkiv National Automobile and Highway University. 2007. No. 38. P. 137–139 (*in Russian*).
4. Study of the composition of the surface film formed under the action of the cluster-v additive / *K.V. Safonov, S.A. Shishurin, V.V. Safonov, V.V. Ostrikov* // Problems of efficiency and operation of automotive and tractor equipment : Proceedings of the XXXVI International Scientific and Technical Conference named after V.V. Mikhailov. Saratov : Saratov State University of Genetics, Biotechnology and Engineering named after N.I. Vavilov, 2023. P. 254–260 (*in Russian*).
5. Comparative assessment of the tribological properties of nanoadditives to materials belonging to the classes of remetalizants and revitalizants / *V.V. Safonov, V.V. Venskaitis, A.I. Fatkin* [et al.] // Problems of efficiency and operation of automotive and tractor equipment : Proceedings of the XXXIV International Scientific and Technical Conference named after V.V. Mikhailov. Saratov : Amirit, 2021. P. 132–137 (*in Russian*).
6. Study of the efficiency of using a layered friction modifier in the cylinder-piston group of a marine diesel engine / *I.N. Guzhvenko, V.A. Chanchikov, N.V. Pryamukhina, E.A. Strinzha* // Marine intellectual technologies. 2018. No. 3, Part 1. P. 135–142 (*in Russian*).
7. Studying the influence of the additive of fine tungsten carbide powder on the anti-friction properties of lubricants / *E.S. Gubin, D.A. Sibrikov, S.V. Titov* [et al.] // Transactions of the Krylov State Research Center. 2024. Vol. 2(408). P. 169–176 (*in Russian*).
8. *Chesnokov A.E., Smirnov A.V., Batraev I.S.* Influence of the microstructure of metal-ceramic powders on the performance characteristics of thermal spray coatings // Surface. X-ray, synchrotron and neutron studies. 2019. No. 7. P. 74–81. DOI 10.1134/S0207352819060040 (*in Russian*).
9. Apparatus for automatic determination of the relative viscosity of petroleum products Lintel VUN-20 // Joint-Stock Company Bashkir Special Design Bureau “Neftekhimavtomatika” : [site]. 2025. URL: https://bashnxa.ru/catalog/kontrol_kachestva_topliv/341/ (Accessed: 27.04.2026) (*in Russian*).
10. Water bath for aging LT-840 // Laboratory Equipment and Instruments : [site]. St. Petersburg, 2026. URL: https://loip.ru/catalog/laboratornoe-oborudovanie-proizvodstva-loip/priboryi-dlya-kontrolya-kachestva-nefteproduktov/loip-lt-840-vodyanaya-banya-na-starenie (Accessed: 10.11.2025) (*in Russian*).
11. Development of a method for experimental determination of the sedimentation rate of mechanical impurities in aviation fuel and a study of the particle shape of the most critical pollutant / *A.N. Timoshenko, S.P. Uryavin, A.N. Kozlov, I.S. Melnikova* // Scientific Bulletin of the State Research Institute of Civil Aviation. 2013. No. 3(314). P. 54–61 (*in Russian*).
12. *Mikhailov A.S.* On two corrections in calculating the settling velocity of finely dispersed material based on Stokes' law // Geology and Geophysics. 1968. Vol. 9, No. 4. P. 111–114 (*in Russian*).
13. *Khvostov A.A., Zhuravlev A.A., Ryabinin E.V.* Mathematical description of the behavior of a spherical body in a viscous fluid // Actual directions of scientific research of the 21st century: theory and practice. 2015. Vol. 3, No. 5-1. P. 302–304. DOI 10.12737/14509 (*in Russian*).
14. *Khvostov A.A., Zhuravlev A.A.* Mathematical model of free sedimentation of a spherical particle in a viscous liquid // Actual directions of scientific research of the 21st century: theory and practice. 2017. Vol. 5, No. 7-1. P. 219–222 (*in Russian*).
15. *Nadezhkin A.V., Danichkin V.N.* Methods of quality control of fuels and lubricants on ships. Vladivostok : Admiral G.I. Nevelskoy Maritime State University, 2022. 105 p. (*in Russian*).
16. *Ponomarev V.A., Katin R.S.* Thermal control and methods for diagnosing engine operation // Current state and current problems of water transport: collection of articles from the V All-Russian scientific and practical student conference. Kazan : Institute of Maritime and River Fleet named after Hero of the Soviet Union M.P. Devyatayev – Kazan branch of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Volga State University of Water Transport”, 2023. P. 138–152 (*in Russian*).
17. Hydrodynamic and thermal processes in the oil cooler of the lubrication system of diesel engines: numerical modeling / *I.A. Popov, Yu.V. Zhukova, A.D. Chorny* [et al.] // Mechanics of machines, mechanisms and materials. 2025. No. 3(72). P. 5–17. DOI 10.46864/1995-0470-2025-3-72-5-17 (*in Russian*).
18. Tungsten carbide WC // Rusplav : [site]. 2025. URL: https://rusplav.ru/material-karbid-volframa-wc (Accessed: 01.11.2025) (*in Russian*).

Сведения об авторах

Иванчик Сергей Николаевич, старший преподаватель кафедры теории корабля, судостроения и технологии

материалов ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет водного транспорта». Адрес: 630099, Россия, Новосибирск, ул. Щетинкина, д. 33. E-mail: tksitm.isn@yandex.ru.

Сибриков Дмитрий Александрович, к.т.н., доцент кафедры судовых энергетических установок ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет водного транспорта». Адрес: 630099, Россия, Новосибирск, ул. Щетинкина, д. 33. E-mail: sibrikov@nsawt.ru.

Губин Евгений Сергеевич, к.т.н., доцент кафедры судовых энергетических установок ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет водного транспорта». Адрес: 630099, Россия, г. Новосибирск, ул. Щетинкина, д. 33. E-mail: e.v.gubin@nsawt.ru.

About the authors

Sergey N. Ivanchik, Senior Lecturer, Department of Ship Theory, Shipbuilding and Materials Technology, Siberian State University of Water Transport. Address: 33, Shchetinkina st., Novosibirsk, Russia, post code 630099. E-mail: tksitm.isn@yandex.ru.

Dmitry A. Sibrikov, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Department of Marine Power Plants, Siberian State University of Water Transport. Address: 33, Shchetinkina st., Novosibirsk, Russia, post code 630099. E-mail: sibrikov@nsawt.ru.

Evgeniy S. Gubin, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Department of Marine Power Plants, Siberian State University of Water Transport. Address: 33, Shchetinkina st., Novosibirsk, Russia, post code 630099. E-mail: e.v.gubin@nsawt.ru.

Поступила / Received: 12.03.26
Принята в печать / Accepted: 15.05.26
© Иванчик С.Н., Сибриков Д.А., Губин Е.С., 2026