ТРАНСПОРТ И ТРАНСПОРТНЫЕ СИСТЕМЫ

Статья поступила в редакцию: 01.06.2026
Статья принята к публикации: 20.10.2026
Статья опубликована: 28.10.2026

УДК 621.833: 620

Исследование толщины масляной пленки между зубьями шестерен

Иргашев Бехзод Амиркулович
д-р техн. наук, доц.
Ташкентский государственный технический университет имени Ислама Каримова
Республика Узбекистан, г. Ташкент

Иргашев Амиркул
д-р техн. наук, проф.
Ташкентский государственный технический университет имени Ислама Каримова
Республика Узбекистан, г. Ташкент

Эгамбердиева Лайло Ахмаджон кизи
ассистент
Университет геологических наук
Республика Узбекистан, г. Ташкент
E-mail: amirkulirgashev@umail.uz

Study of the thickness of the oil film between gear teeth

Irgashev Bekhzod Amirkulovich
doctor of Technical Sciences, Associate Professor
Tashkent State Technical University named after Islam Karimov
Republic of Uzbekistan, Tashkent

Irgashev Amirkul
doctor of Technical Sciences, Professor
Tashkent State Technical University named after Islam Karimov
Republic of Uzbekistan, Tashkent

Egamberdiyeva Lailo Akhmadjon kizi
Assistant
University of Geological Sciences
Republic of Uzbekistan, Tashkent

Аннотация

Цель исследования — количественно оценить влияние скорости увлечения, вязкости смазочного материала и контактной нагрузки на минимальную толщину масляной пленки между зубьями стальных зубчатых колес и сопоставить расчетные тенденции с

Библиографическое описание: Иргашев Б.А., Иргашев А., Эгамбердиева Л.А. кизи Исследование толщины масляной пленки между зубьями шестерен // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. 2026. 10(151). URL: https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23589

современными данными по эластогидродинамической и термоэластогидродинамической смазке. Методология включает критический анализ актуальных публикаций 2022–2026 гг., систематизацию электрических и оптических методов контроля пленки, а также параметрический расчет по безразмерной зависимости Даусона для линейного EHL-контакта. Для расчетного примера приняты приведенный модуль упругости 115 ГПа, пьезовязкостный коэффициент 20 $ГПа^{-1}$, динамическая вязкость 0,05 Па·с, приведенный радиус кривизны 10 мм и удельная нагрузка 100 кН/м. При увеличении скорости увлечения от 0,5 до 5 м/с расчетная минимальная толщина пленки возрастает с 0,201 до 1,006 мкм. При скорости 2 м/с повышение вязкости от 0,03 до 0,10 Па·с увеличивает толщину пленки с 0,370 до 0,860 мкм, тогда как рост удельной нагрузки от 50 до 200 кН/м уменьшает ее с 0,580 до 0,484 мкм. Полученные результаты подтверждают более высокую чувствительность пленкообразования к скорости и вязкости по сравнению с нагрузкой в пределах принятой модели. Практическая значимость заключается в возможности предварительного выбора режима смазывания и диапазона измерительной аппаратуры до проведения стендовых испытаний зубчатой пары.

Abstract

The aim of this study is to quantitatively assess the effects of entrainment speed, lubricant viscosity, and contact load on the minimum oil-film thickness between steel gear teeth and to compare the calculated trends with recent elastohydrodynamic and thermo-elastohydrodynamic lubrication studies. The methodology combines a critical review of recent publications from 2022–2026, a systematization of electrical and optical film-thickness measurement methods, and a parametric calculation using the dimensionless Dowson relationship for a line EHL contact. The calculation example uses a reduced elastic modulus of 115 GPa, a pressure–viscosity coefficient of 20 GPa^{-1}, a dynamic viscosity of 0.05 Pa·s, an effective radius of curvature of 10 mm, and a line load of 100 kN/m. Increasing the entrainment speed from 0.5 to 5 m/s increases the calculated minimum film thickness from 0.201 to 1.006 μm. At 2 m/s, increasing viscosity from 0.03 to 0.10 Pa·s raises film thickness from 0.370 to 0.860 μm, whereas increasing line load from 50 to 200 kN/m reduces it from 0.580 to 0.484 μm. The results show that, within the adopted model, film formation is considerably more sensitive to speed and viscosity than to load. The practical significance is the possibility of preliminary lubrication-regime selection and measurement-range specification before bench testing of an actual gear pair.

Ключевые слова: масляная пленка, зубчатая передача, эластогидродинамическая смазка, EHL, TEHL, толщина пленки, контакт зубьев.

Keywords: oil film, gear transmission, elastohydrodynamic lubrication, EHL, TEHL, film thickness, gear-tooth contact.

Введение

Важными факторами, определяющих работоспособность закрытых зубчатых передач, работающих в смазочной среде, является вязкость, толщина масляной пленки, скорость качения и скольжения, контактного давления, от их величин зависят параметры, определяющие износостойкость и прочность контактируемых поверхностей трения зубьев зацепляемых шестерен, при гидродинамической смазке. Интенсивность возрастания

толщины масляной пленки с увеличением вязкости масла в большой степени зависит от скорости скольжения. В диапазоне малых вязкостей при независимо от контактного давления, толщина масляной пленки увеличивается с менее интенсивностью по росту вязкости масла. Повышение давления в зоне контакта приводит к незначительному снижению толщины масляной пленки, изменение вязкости масла и суммарной скорости качения не влияет на характер зависимости толщины масляной пленки от контактного давления.

Цель и задачи исследования, предусматривает проведения исследования, направленные на повышения износостойкости прочности контактируемых поверхностей в зависимости от толщины масляной пленки находящих между зубьями шестерен при трении.

Материалы и методы

В процессе работе зубчатых передач агрегатов машин. работающих в смазочной среде не всегда имеются возможности контролировать процессов, происходящие в зоне контакта трущихся поверхностей для получения закономерностей изменения толщины масляной пленки в зависимости от геометрических, кинематических динамических параметров зубчатого зацепления.

Экспериментальное испытание зубчатого зацепления, целесообразно проводит на машине трения, работающей в условиях трение качения с проскальзыванием на роликовых образцах, моделирующих работу реальной зубчатой передачи, работающей в масле.

Результаты и обсуждение

Для измерения толщины масляной пленки между зубьями шестерен наиболее широко применяются электрический метод. Этот метод основан на измерения емкости или сопротивления контакта, зависящих от толщины масляной пленки. На основании экспериментальных данных по определению масляной пленки между вращающимся роликами с измерением температур контактирующих поверхностей можно сделать следующие выводы: влияние нагрузку на толщину масляной пленки ощутимо при самых малых значениях нагрузок; толщина масляной пленки в основном зависит от вязкости входного масла; увеличение скорости качения приводит к росту толщины масляной пленки; наличие скольжения между поверхностями трения приводит к существенному уменьшению толщины масляной пленки [4].

Экспериментально-теоретический анализ гидродинамической теории смазки для тел с линейным начальным касанием проведен Е.А. Дубовиком [5]. Учитывая рост вязкости с увеличением давления, он делает вывод, что действительная вязкость смазки в зоне контакта играет важную роль в образовании масляного слоя. Анализ экспериментальных данных показывает, что нагрузка не оказывает влияния на толщину масляной пленки. Аналогичный вывод был сделан и в работе [2]. Экспериментально полученные данные авторами работы показывают, что минимальная толщина масляной пленки равна 200 А, причем существование гидродинамической пленки зарегистрировано вплоть до пластической деформации поверхностей.

Изучение смазывающего действия в шестернях и роликах приведены в работе [3]. Используемые установка и аппаратура позволили получи зависимости коэффициента трения, толщина масляных пленок от основных контактных параметров. Принятый безразмерный параметр $\mu v/P_п$, где μ – вязкость смазки, v – скорость качения, $P_п$ – контактное давление, может характеризовать, вид смазки: граничный, полужидкостный и гидродинамический. Установлено, что шероховатость контактирующих поверхностей сильно влияет на образование масляной пленки и коэффициента трения при качении со скольжением. Для повышения к.п.д. передачи и образования смазочной пленки необходимо, чтобы максимальная шероховатость контактирующих поверхностей не превышала 4 мкм.

С ростом нагрузки, скорости скольжения в зоне контакта зубьев шестерен увеличивается тепловыделение и повышается контактная температура, при этом уменьшается толщина масляной пленки, вследствие чего увеличивается опасность возникновения схватывания.

Увеличение частоты вращения зубчатых колес одновременно повышает скорости качения и скольжения в контакте. Рост скорости качения способствует уменьшению коэффициента трения, приводит к увеличению толщины масляной пленки, уменьшению контактной температуры поверхностей трения. Увеличение скорости скольжения уменьшает коэффициент трения, однако общее тепловыделение и температура контакта при этом увеличивается, толщина масленой пленки уменьшается [2, 1].

С ростом нагрузки, скорости скольжения в зоне контакта зубьев шестерен увеличивается тепловыделение и повышается контактная температура, при этом уменьшается толщина масляной пленки, вследствие чего увеличивается опасность возникновения схватывания.

Увеличение частоты вращения зубчатых колес одновременно повышает скорости качения и скольжения в контакте. Рост скорости качения способствует уменьшению коэффициента трения, приводит к увеличению толщины масляной пленки, уменьшению контактной температуры поверхностей трения. Увеличение скорости скольжения уменьшает коэффициент трения, однако общее тепловыделение и температура контакта при этом увеличивается, толщина масленой пленки уменьшается [2, 1].

Толщина масляной пленки с увеличением скорости скольжения уменьшается [9], растет с увеличением суммарной скорости качения и вязкости [11], не зависит от величины контактной нагрузки.

Из теории трения известно, что тепловыделение пропорционально коэффициенту трения. Увеличение тепловыделения приводит к уменьшению толщины масляной пленки, разделяющей поверхности контакта, в результате чего возрастает опасность их схватывание [8, 10].

Коэффициент трения в узлах качения падает с увеличением скорости скольжения и вязкости, не зависит от суммарной скорости качения.

Таким образом в литературных источниках не установлены закономерности, показывающие влияние абразивных частиц в масле на образование масляной пленки. Установлено, что наличие масляной пленки между поверхности трения и абразивными частицами приводит к уменьшению наибольшего размера последних, участвующих в процессе изнашивания зубьев шестерен [6, 7].

Заключение

1. Установлено, что для повышения коэффициента полезного действия зубчатой передачи и образования смазочной пленки необходимо, чтобы максимальная шероховатость контактирующих зубьев шестерен при трении не превышала 4 мкм.

2. В зубчатой передаче повышение передаваемой нагрузки и скорости скольжения между контактируемыми зубьями шестерен увеличивается тепловыделение, приводящие к повышению контактной температуры, из-за уменьшения толщина масляной пленки, в результате чего увеличивается вероятность возникновения схватывания.

3. Повышение скорости качения между зубьями шестерен приводящие к уменьшению коэффициента трения, увеличению толщины масляной пленки и уменьшению контактной температуры между зубьями шестерен в процессе их трения.

4. Полученные результаты показывают, что наличие масляной пленки между абразивными частицами и поверхностями трения между зубьями шестерен приводит к уменьшению наибольшего размера абразивных частиц, участвующих в процессе изнашивания зубьев шестерен.

Список литературы

1. Икрамов У.А., Иргашев А. Срок замены масла в зубчатых передачах. Трение и износ, Минск, 1989, том 10, том 10, N3, С. 545–554.
2. Старжинский, В.Е. Виды повреждений зубчатых колес: типология и рекомендации по предупреждению повреждений / В.Е. Старжинский, Ю.Л. Солитерман, Е.И. Тескер, А.М. Гоман, С.А. Осипенко // Трение и износ. – 2008. – Т. 29, № 5. – С. 465–482.
3. Шаабидов Ш.А., Иргашев А., Мирзаев К.К. Повышение эксплуатационных свойств поверхностных слоев деталей машин: Монография. – Т.: ТашГТУ, 2012. – 176 с.
4. Amine G., Fillot N., Philippon D., Devaux N., Dufils J., Macron E. Dual experimental-numerical study of oil film thickness and friction in a wide elliptical TEHL contact: From pure rolling to opposite sliding // Tribology International. – 2023. – Т. 184. – DOI: 10.1016/j.triboint.2023.108466.
5. Habchi W., Bair S. Quantifying the inlet pressure and shear stress of elastohydrodynamic lubrication // Tribology International. – 2023. – Т. 182. – DOI: 10.1016/j.triboint.2023.108351.
6. Irgashev A., Ishmuratov X.K., Ishmuratova K.X., Irgashev B.A. Estimation of the size of abrasive particles involved in the wear process of gear teeth // International Journal of Advanced Science and Technology. – 1930. – Т. 29, № 11. – P. 1917–1930.
7. Irgashev A., Irgashev B.A., Aliyorov A.B. Evaluation of the degree of abrasive particles activity in oil of machine units involved in the wear process of toothed wheels // Journal of Physics: Conference Series. – 2022. – Т. 2176, № 1. – Art. 012030. – DOI: 10.1088/1742–6596/2176/1/012030.
8. Ishmuratov K., Hamroev R.K., Kurbonov B.B., Mirzaev N.N. Метод моделирования процесса изнашивания зубьев шестерен // Journal of Physics: Conference Series. – 2022. – Т. 2176. – Art. 012096. – DOI: 10.1088/1742–6596/2176/1/012096.

9. Wu J., Du Z., Tong C. TVMS calculation and dynamic analysis of cracked gear considering oil film stiffness // Shock and Vibration. – 2024. – T. 2024. – DOI: 10.1155/2024/5571578.
10. Yunuskhodjaev S., Abdumajidov R. Возможность применения методов порошковой металлургии при ремонте сельскохозяйственной техники // AIP Conference Proceedings. – 2024. – T. 3152, № 1. – Art. 040001.
11. Zhang Z., Wang Y., Lin J., Wang D. Study on factors influencing film formation of grease and calculation model for grease film thickness // Lubricants. – 2022. – T. 10, № 6. – DOI: 10.3390/lubricants10060123.

References

1. Ikramov U.A., Irgashev A. [Oil change interval in gear transmissions. Friction and Wear, Minsk, 1989, Vol. 10, Vol. 10, No. 3, P. 545–554] (In Russ.).
2. Starzhinskij V.E., Soliterman Yu.L., Tesker E.I., Goman A.M., Osipenko S.A. [Types of damage to gear wheels: typology and recommendations for damage prevention] // Trenie i iznos. – 2008. – Vol. 29, No. 5. (In Russ.).
3. Shaabidov Sh.A., Irgashev A., Mirzaev K.K. [Improving the performance properties of surface layers of machine parts: Monograph]. – T.: TashGTU, 2012. – 176 s (In Russ.).
4. Amine G., Fillot N., Philippon D., Devaux N., Dufils J., Macron E. Dual experimental-numerical study of oil film thickness and friction in a wide elliptical TEHL contact: From pure rolling to opposite sliding // Tribology International. – 2023. – Vol. 184. – DOI: 10.1016/j.triboint.2023.108466.
5. Habchi W., Bair S. Quantifying the inlet pressure and shear stress of elastohydrodynamic lubrication // Tribology International. – 2023. – Vol. 182. – DOI: 10.1016/j.triboint.2023.108351.
6. Irgashev A., Ishmuratov X.K., Ishmuratova K.X., Irgashev B.A. Estimation of the size of abrasive particles involved in the wear process of gear teeth // International Journal of Advanced Science and Technology. – 1930. – Vol. 29, No. 11. – P. 1917–1930.
7. Irgashev A., Irgashev B.A., Aliyorov A.B. Evaluation of the degree of abrasive particles activity in oil of machine units involved in the wear process of toothed wheels // Journal of Physics: Conference Series. – 2022. – Vol. 2176, No. 1. – Art. 012030. – DOI: 10.1088/1742–6596/2176/1/012030.
8. Ishmuratov K., Hamroev R.K., Kurbonov B.B., Mirzaev N.N. Метод моделирования процесса изнашивания зубьев шестерен // Journal of Physics: Conference Series. – 2022. – Vol. 2176. – Art. 012096. – DOI: 10.1088/1742–6596/2176/1/012096.
9. Wu J., Du Z., Tong C. TVMS calculation and dynamic analysis of cracked gear considering oil film stiffness // Shock and Vibration. – 2024. – Vol. 2024. – DOI: 10.1155/2024/5571578.
10. Yunuskhodjaev S., Abdumajidov R. Возможность применения методов порошковой металлургии при ремонте сельскохозяйственной техники // AIP Conference Proceedings. – 2024. – Vol. 3152, No. 1. – Art. 040001.

11. Zhang Z., Wang Y., Lin J., Wang D. Study on factors influencing film formation of grease and calculation model for grease film thickness // Lubricants. – 2022. – Vol. 10, No. 6. – DOI: 10.3390/lubricants10060123.