

established that the use of hydrophobic additives in the production of lump peat improves the quality characteristics of the initial peat raw materials, has a positive effect on the water-physical characteristics of the finished product, makes it possible to reduce the dependence of production technology on the meteorological conditions of the production region, as well as to reduce the drying elongation to zero due to moisture exchange with the deposit. Application of hydrophobic additives in technology of lump peat production makes it possible to reduce initial moisture content of peat mass before moulding, thus reducing energy costs for production.

Keywords: sod peat, extraction, field drying, hydrophobic additive, technology, water absorption, water-repellent ability.

Поступила в редакцию/received: 27.02.2026; после рецензирования/revised: 17.03.2026;
принята/accepted: 02.04.2026

УДК 621.928.26

DOI: 10.46573/2658-5030-2026-3-65-73

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТОЛЩИНЫ ДИСКА ВАЛКОВОГО СОРТИРУЮЩЕ-СЕПАРИРУЮЩЕГО УСТРОЙСТВА

С.М. КОЧКАНЯН, канд. техн. наук, А.В. КОНДРАТЬЕВ, д-р техн. наук

Тверской государственный технический университет,
170026, Тверь, наб. Аф. Никитина, 22, e-mail: avkondr@ya.ru

© Кочканян С.М., Кондратьев А.В., 2026

Представлена математическая модель расчета толщины диска валкового сортирующе-сепарирующего устройства. Модель позволяет учитывать комплекс динамических нагрузок, возникающих при ударном взаимодействии диска с частицами тяжелой фракции, а также центробежные напряжения, обусловленные вращением дисков. При помощи полученной расчетной зависимости можно установить прямую взаимосвязь между кинематическими, конструктивными и технологическими параметрами валкового сортирующего устройства. На основании модели выполнена графическая интерпретация влияния массы тяжелой фракции, частоты вращения и радиуса диска на минимально допустимую его толщину. Установлено, что толщина диска монотонно возрастает с увеличением его радиуса и частоты вращения, а также с повышением массы транспортируемого камня, вследствие роста ударных нагрузок со стороны твердых включений. Практическая значимость модели заключается в возможности рационального выбора толщины дисков при проектировании сортирующих устройств валкового типа для гравия и щебня, что способствует повышению надежности и эффективности их работы.

Ключевые слова: валковое сортирующе-сепарирующее устройство, частота вращения валов, толщина дисков, ударная нагрузка, математическая модель, гравий и щебень.

ВВЕДЕНИЕ

Процессы сортировки и сепарации полидисперсных минеральных сыпучих материалов являются важным этапом технологических схем в горнодобывающей, строительной и перерабатывающей промышленности. Эффективность последующих

операций дробления, обогащения и транспортирования в значительной степени определяется качеством предварительного разделения материала по крупности и плотности.

Современные валково-дисковые сепарирующие устройства широко применяются для обработки минеральных смесей, однако их работоспособность и ресурс во многом зависят от прочности и долговечности дисковых рабочих органов. В процессе эксплуатации диски подвергаются многократным ударно-контактным воздействиям со стороны частиц крупной фракции, что приводит к возникновению изгибных и контактных напряжений [1–5]. Эффективность работы таких устройств в значительной степени определяется радиусом и толщиной дисков, частотой вращения валов, шагом установки дисков на валу, а также прочностными характеристиками дисков [6–8].

Анализ существующих методик расчета показывает, что в большинстве случаев дисковые рабочие органы рассматриваются в статической или квазистатической постановке без достаточного учета динамического характера взаимодействия с перерабатываемым материалом. Это приводит к недооценке действующих нагрузок и, как следствие, к ускоренному износу или разрушению элементов конструкции.

В связи с вышесказанным актуальной задачей является разработка инженерно обоснованной расчетной методики определения толщины диска валкового сортирующе-сепарирующего устройства, обеспечивающей его прочность и работоспособность в условиях ударно-контактного взаимодействия с частицами максимальной крупности.

Цель работы заключается в получении аналитической зависимости для определения расчетной толщины дискового рабочего органа с учетом:

- кинематических параметров устройства;

- геометрических характеристик диска;

- механических свойств материала;

- динамического характера взаимодействия «частица – диск».

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

- разработка математической модели расчета толщины диска с учетом ударных, изгибающих и центробежных нагрузок;

- выполнение графоаналитических исследований влияния основных параметров на напряженно-деформированное состояние дисков;

- определение рациональных параметров сепарирующего устройства, обеспечивающих надежность и эффективность процесса сортировки.

ОБЪЕКТ, МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ

Объектом исследования является валковое сортирующе-сепарирующее устройство, предназначенное для разделения полидисперсных минеральных и минерально-органических сыпучих материалов. Устройство включает систему последовательно расположенных валов с многогранными дисками.

Аналитические исследования выполнялись с использованием положений линейной теории упругости, динамики удара и инженерных подходов к оценке напряженного состояния вращающихся дисков. Расчет напряженно-деформированного состояния дискового рабочего органа осуществлялся в квазистатической постановке с приведением ударного воздействия к эквивалентной средней силе.

В расчетной модели диск рассматривался как консольно закрепленный элемент с защемлением по внутреннему диаметру в зоне посадки на вал. Нагрузка прикладывалась в точке контакта на наружной кромке диска. Ударное взаимодействие

частицы с диском моделировалось как кратковременный импульсный контакт с передачей части кинетической энергии вращающегося диска частице. Для описания динамического характера взаимодействия использовалась энергетическая постановка с введением эффективной деформации контакта, учитывающей суммарную податливость системы «диск–частица–слой материала».

В расчетах учитывались:

- изгибающие напряжения от сосредоточенной ударной нагрузки;
- напряжения вращения от центробежных сил;
- локальный характер передачи нагрузки в зоне контакта.

Для оценки влияния конструктивных и кинематических параметров проводился параметрический анализ зависимостей расчетной толщины диска от частоты его вращения, радиуса диска и массы взаимодействующей с ним частицы. Работу диска рассматривали в области линейной упругости материала при отсутствии пластической деформации.

Пределы варьирования факторов:

- размер материала – 0,1...0,3 м;
- масса частицы – 5...15 кг;
- плотность частицы – 1 800...2 900 кг/м³;
- радиус диска – 0,05...0,17 м;
- междисковый промежуток – 0,03 м;
- частота вращения дисков – 50...150 об/мин .

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

С учетом характера нагружения расчетная схема диска принималась в виде консольного элемента, подверженного изгибу под действием эквивалентной ударной силы F_k и напряжений вращения от центробежных сил. Диск радиусом R_d с окружной скоростью v_0 взаимодействовал с частицей массой m_k , в результате чего частица изменяла скорость и траекторию движения (рис. 1).

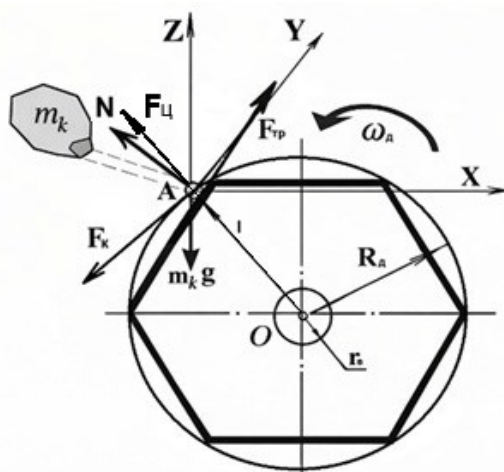


Рис. 1. Схема импульсно-ударного взаимодействия минеральной частицы с гранью многогранного диска радиуса R_d

Анализ силового взаимодействия показывает, что максимальные напряжения в диске определяются изгибом от сосредоточенной ударной нагрузки, тогда как напряжения от кручения в рассматриваемых режимах не являются определяющими.

Для расчетной модели взаимодействия диска с частицей приняты следующие допущения:

диск рассматривается как изотропный упругий элемент, работающий преимущественно на изгиб;

ударное воздействие моделируется квазистатически эквивалентной силой F_k в зоне контакта;

контакт локализован и локальные напряжения по Герцу не рассматриваются, поскольку они не характеризуют общую изгибающую прочность диска;

температурные эффекты, износ и остаточные напряжения не учитываются;

расчет выполняется для наиболее неблагоприятного взаимодействия с частицей максимальной массы.

Принятые допущения позволяют получить инженерно обоснованную оценку напряженно-деформированного состояния дискового рабочего органа в условиях эксплуатации валкового сортирующе-сепарирующего устройства.

Расчетная толщина диска b_d находится из условия прочности, при котором эквивалентное напряжение не превышает допускаемое:

$$\sigma_{\text{экв}} \leq \frac{[\sigma]}{n_3}, \quad (1)$$

где $[\sigma]$ – допускаемое напряжение материала диска, Па; $n_3 = 1,5$ – коэффициент запаса прочности.

Рассматривая изгиб диска от ударного воздействия, изгибающий момент у основания вычисляем по формуле

$$M = F_k l, \quad (2)$$

где l – расчетный вылет от вала до точки контакта на наружной кромке диска $l = R_d - r_v$, где R_d – радиус диска, м; r_v – радиус вала, на который насажен диск, м.

Эквивалентная средняя сила за время контакта находится из условия преобразования кинетической энергии в работу деформации:

$$F_k = \frac{m_{\text{эфф}} v_0^2}{2\Delta_{\text{эфф}}},$$

где $m_{\text{эфф}}$ – эффективная масса, кг, которая характеризует долю массы частицы, участвующую в ударном взаимодействии с диском:

$$m_{\text{эфф}} = \varphi_m m_k;$$

v_0 – окружная скорость дисков, м/с:

$$v_0 = \frac{\pi D_d n_d}{60},$$

тогда

$$F_k = \frac{\varphi_m m_k (\pi R_d n_d)^2}{1800 \Delta_{\text{эфф}}}, \quad (3)$$

где $\varphi_m = 0,2$ – коэффициент распределения ударной энергии между дисками и слоем материала; $m_{\square}$ – масса минеральной частицы, кг; n_d – частота вращения дисков, об/мин; $\Delta_{\text{эфф}} = 0,010 \dots 0,015$ м – эффективная деформация контакта «диск – частица – слой», учитывающая локальное смятие и прогиб диска [9].

Для оценки напряжений изгиба диск рассматривается как консольная полоса эффективной ширины a и толщины b_d . Модуль сопротивления сечения

$$W = \frac{ab_d^2}{6}. \quad (4)$$

Эффективная ширина зоны передачи нагрузки принимается в виде:

$$a = k_b t_{\text{шд}}, \quad k_b \in [0,6; 1,0],$$

где $t_{\text{шд}}$ – шаг установки дисков по оси вала, м; k_b – коэффициент, учитывающий локализацию контакта на грани диска [10].

Максимальное изгибающее напряжение определяется как

$$\sigma_b = \frac{M}{W}. \quad (5)$$

Подставив выражения (2) и (4) в формулу (5), получим:

$$\sigma_b = \frac{6F_k l}{ab_d^2}, \quad (6)$$

Для вращающегося диска напряжения от центробежных сил принимаются по инженерной оценке, приведенной в источниках [11, 12]. Она позволяет эффективно решать задачи обеспечения надежности вращающихся дисков в различных машинах и агрегатах.

$$\sigma_c = k_c \cdot \rho_d \cdot \omega_d^2 R_d^2, \quad (7)$$

где $k_c = 0,3 \dots 0,4$ – инженерный коэффициент, учитывающий реальную форму диска; ρ_d – плотность материала диска, кг/м³; $\omega_d = \pi n_d / 30$ – угловая скорость, рад/с.

Эквивалентное напряжение принимается по инженерной оценке:

$$\sigma_{\text{экв}} \approx \sqrt{\sigma_b^2 + \sigma_c^2}. \quad (8)$$

Подставив выражения (6), (7) в условие прочности (1), получим:

$$\sqrt{\sigma_b^2 + \sigma_c^2} \leq \frac{[\sigma]}{n_3}. \quad (9)$$

Таким образом, подстановкой выражений (3), (6), (7) в (9) получим зависимость для определения расчетной толщины диска валкового сортирующе-сепарирующего устройства:

$$b_d \geq \sqrt{\frac{(R_d - r_b) \cdot n_3 \cdot \varphi_m \cdot m_k \cdot \pi^2 R_d^2 n_d^2}{300 t_{шд} \cdot \Delta_{эфф} \sqrt{[\sigma]^2 - n_3^2 \left(\frac{k_c \cdot \rho_d \cdot \pi^2 \cdot R_d^2 \cdot n_d^2}{900} \right)^2}}} . \quad (10)$$

Выражение (10) устанавливает аналитическую связь между кинематическими параметрами (n_d, v_0), конструктивными параметрами ($R_d, t_{шд}, l, b_d$) и технологическими характеристиками материала ($m_k, \varphi_m, \Delta_{эфф}$).

Рост частоты вращения и радиуса дисков, а также массы минеральной частицы приводит к увеличению ударной силы F_k и напряжений вращения σ_c , что обуславливает необходимость увеличения толщины b_d . Полученная методика позволяет инженерно обоснованно назначать толщину дисков на стадии проектирования валковых сортирующе-сепарирующих устройств.

Для оценки влияния конструктивных и кинематических параметров выполнен параметрический анализ зависимостей $b_d(n_d)$, $b_d(R_d)$ и $b_d(m_k)$ при фиксированных условиях: $s = 0,03$ м, $d_b = 0,05$ м, $\Delta_{эфф} = 0,012$ м, $\varphi_m = 0,2$, $k_c = 0,35$, $\rho_d = 7800$ кг/м³, $[\sigma] = 240$ МПа, $n_3 = 1,5$.

Согласно выражению (10), с увеличением частоты вращения n_d возрастают ударные и центробежные нагрузки, вследствие чего зависимость $b_d(n_d)$ является монотонно возрастающей функцией (рис. 2).

Увеличение массы крупной фракции m_k приводит к возрастанию энергии ударного взаимодействия и, как следствие, к увеличению требуемой толщины диска. Зависимость $b_d(m_k)$ имеет возрастающий нелинейный характер (рис. 3).

При увеличении радиуса R_d возрастает как окружная скорость кромки, так и изгибающий момент, что ведет к увеличению расчетной толщины диска. В исследованном диапазоне зависимость $b_d(R_d)$ носит монотонно возрастающий характер (рис. 4).

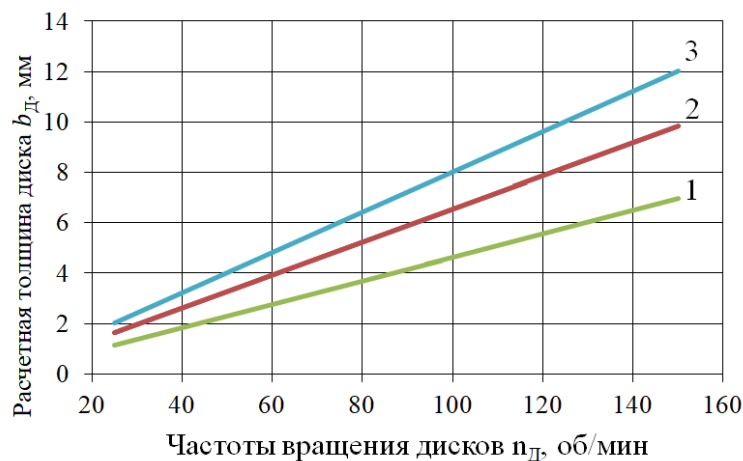


Рис. 2. Влияние частоты вращения дисков на расчетную толщину диска при m_k , кг: 1 – 5; 2 – 10; 3 – 15 ($R_d = 0,17$ м)

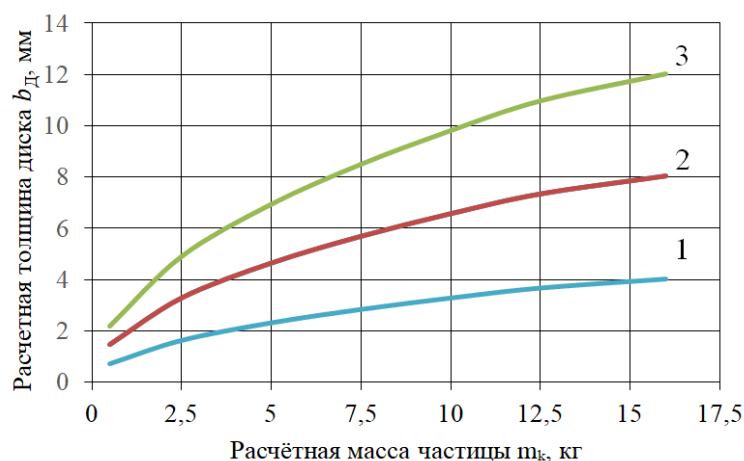


Рис. 3. Влияние расчетной массы частицы на расчетную толщину диска при n_d , об/мин:
1 – 50; 2 – 100; 3 – 150 ($R_d = 0,17$ м)

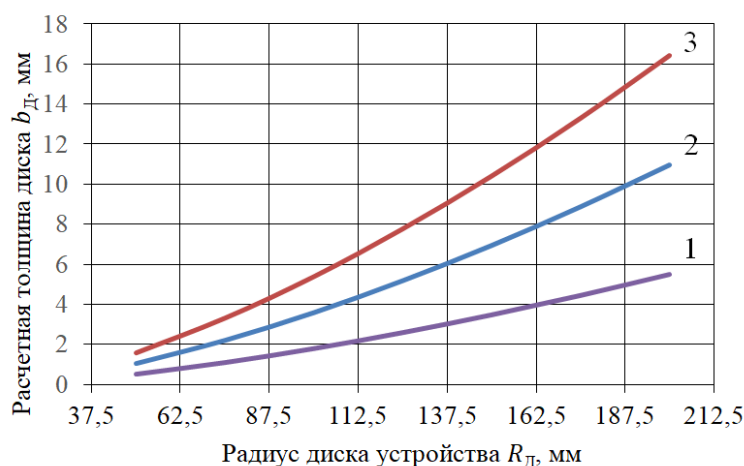


Рис. 4. Влияние радиуса диска на расчетную толщину диска при n_d , об/мин:
1 – 50; 2 – 100; 3 – 150 ($m_k = 15$ кг)

ВЫВОДЫ

Получена аналитическая зависимость для определения расчетной толщины диска валкового сортирующе-сепарирующего устройства по условию прочности с учетом совместного действия ударной и центробежной составляющих нагрузки.

Ударно-контактное воздействие частицы на диск учтено через эквивалентную среднюю силу F_k , определяемую в энергетической постановке по эффективной деформации $\Delta_{эфф}$ и коэффициенту распределения нагрузки φ_m , что позволяет учитывать динамический характер взаимодействия «частица – диск» в проектных расчетах.

Прочностной расчет выполнен с учетом совместного действия изгибающих и центробежных напряжений на диск как консольно-закрепленный элемент с защемлением по внутреннему диаметру в зоне посадки на вал.

Установлено, что расчетная толщина диска монотонно возрастает с увеличением частоты вращения валов, радиуса диска и массы частицы.

Предложенный методический подход может использоваться при проектировании валково-дисковых сортирующе-сепарирующих устройств и может

быть адаптирован для оценки элементов, работающих в условиях ударно-контактного взаимодействия с полидисперсными средами.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенная математическая модель определения расчетной толщины диска может служить основой для разработки инженерной методики определения основных конструктивных и кинематических параметров валковых сортирующе-сепарирующих устройств с учетом условий их эксплуатации. Результаты работы могут быть использованы при создании новых и модернизации существующих валково-дисковых сепараторов для переработки полидисперсных минеральных и минерально-органических сыпучих смесей, а также при разработке инженерных рекомендаций по проектированию рабочих органов машин данного класса.

ЛИТЕРАТУРА

1. Юдин А.В., Шестаков В.С. Выбор оборудования и оценка схем мобильных карьерных комплексов при отработке закарстовых месторождений // *Известия вузов. Горный журнал*. 2017. № 1. С. 92–100.
2. Бондарев Ю.Ю., Звонарев Е.И., Иванов С.Л., Шишлянников Д.И. Валково-дисковый сепаратор автономного комплекса добычи и переработки торфяного сырья на топливо // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология. Нефтегазовое и горное дело*. 2015. № 14. С. 72–81.
3. Михайлова Н.В., Бизяев О.Ю., Спиридонов П.А. Устройство валкового типа для классификации влажного сырья // *Обогащение руд*. 2016. № 4. С. 48–55.
4. Абдуллах А.К. Обоснование конструкции и параметров валкового грохота для сортировочных комплексов дорожно-строительных машин: дис. ... канд. техн. наук. Тверь, 2014. 118 с.
5. Кузев Д.П. Повышение износостойкости дисков валкового грохота для сортировки кокса: дис. ... канд. техн. наук. Москва, 2009. 140 с.
6. Русинкевич В.А., Кочкян С.М., Кондратьев А.В. Результативность грохочения гравия в зависимости от параметров валковой желобообразной сортировки со шнековым интенсификатором // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2014. № 5. С. 188–192.
7. Кондратьев А.В., Кочкян С.М., Лысенко Т.И., Гусаров А.А. К вопросу распределения и просеивания гравия по поверхности желобообразного валкового сита // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2022. № 4 (16). С. 46–53.
8. Борщов Т.С., Гинтовт И.А. Культуртехника в Нечерноземной зоне. М.: Колос, 1981. 253 с.
9. *Механика композиционных материалов и конструкций, сложных и гетерогенных сред: Сб. трудов 14-й Всероссийской научной конференции с международным участием*. М.: ООО «Сам Полиграфист», 2024. 324 с.
10. Ржаницын А.Р. Строительная механика: учебное пособие для вузов. М.: Высшая школа, 1982. 400 с.
11. Болотин В.В. Динамика и прочность машин. М.: Машиностроение, 1979. 344 с.
12. Афанасьев А.А. Задачи определения напряженно-деформированного состояния вращающихся дисков: дис. ... канд. физ.-мат. наук. Воронеж, 2015. 124 с.

Для цитирования: Кочкян С.М., Кондратьев А.В. Определение толщины диска валкового сортирующе-сепарирующего устройства // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки». 2026. № 3 (31). С. 65–73.

DETERMINING THE THICKNESS OF A DISK OF A ROLLING SORTING AND SEPARATING DEVICE

S.M. KOCHKANYAN, Cand. Sc., A.V. KONDRATYEV, Dr. Sc.

Tver State Technical University,
22, Af. Nikitin emb., Tver, 170026, e-mail: avkondr@ya.ru

A mathematical model for calculating the thickness of a roll-sorting and separating device is presented. The model allows for the consideration of a complex of dynamic loads arising from the impact of the disk with heavy fraction particles, as well as centrifugal stresses caused by the rotation of the disks. The obtained calculation dependence allows for the establishment of a direct relationship between the kinematic, design, and technological parameters of the roll-sorting device. Based on the model, a graphical interpretation of the influence of the heavy fraction mass, rotational speed, and disk radius on the minimum allowable disk thickness is provided. The practical significance of the model lies in the possibility of rationally selecting disk thickness when designing roller sorting devices for gravel and crushed stone, which contributes to increased reliability and efficiency.

Keywords: roller sorting and separating device, shaft rotation speed, disc thickness, impact load, mathematical model, gravel, and crushed stone.

Поступила в редакцию/received: 15.04.2026; после рецензирования/revised: 17.04.2026;
принята/accepted: 28.04.2026

УДК 622.05:544.25:621.89

DOI: 10.46573/2658-5030-2026-3-73-85

МАГНИТНЫЕ СМАЗОЧНЫЕ ЖИДКОСТИ В ГОРНОМ ДЕЛЕ: ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ, ТРИБОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ

А.Н. БОЛОТОВ, д-р техн. наук, А.Л. ЯБЛОНЕВ, д-р техн. наук

Тверской государственный технический университет,
170026, Тверь, наб. Аф. Никитина, 22, e-mail: alnikbltov@rambler.ru

© Болотов А.Н., Яблонев А.Л., 2026

Экстремальные условия эксплуатации горнодобывающего оборудования (абразивная пыль, высокая влажность, ударно-вибрационные нагрузки, широкий диапазон температур) лимитируют ресурс традиционных смазочных материалов и уплотнительных устройств. В статье представлен аналитический обзор физико-химических, реологических и трибологических свойств магнитных смазочных жидкостей (МСЖ) как класса «интеллектуальных» жидкостей и смазок. На основе