

СОВРЕМЕННАЯ ТРИБОЛОГИЯ: МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Е.А. РАТКЕВИЧ, канд. хим. наук, А.Н. БОЛОТОВ, д-р техн. наук

Тверской государственный технический университет,
170026, Тверь, наб. Аф. Никитина, 22, e-mail: ekrasavina26@gmail.com

© Раткевич Е.А., Болотов А.Н., 2026

В статье приводится обоснование необходимости разработки интегрированной мультискальной методологии в трибологии, сочетающей экспериментальные данные, полученные на макро- и микроскопическом уровнях с учетом химических превращений на поверхностях в процессе трения и их обработку методами компьютерного моделирования. Методология позволяет детально исследовать процессы трения и износа на всех структурных уровнях – от атомарного до макроскопического масштаба. Это существенно повышает точность прогнозирования долговечности материалов и открывает новые возможности для проектирования инновационных решений в областях высоких технологий. Оценивались такие методы, как спектроскопия, микроиндентирование, трибометрия и атомно-силовая микроскопия, а также перспективы и возможности применения искусственного интеллекта и машинного обучения для описания трибопроцессов.

Ключевые слова: трибология, макроскопический анализ, микроскопический анализ, атомно-силовая микроскопия, трибометрия, спектроскопия, компьютерное моделирование.

ВВЕДЕНИЕ

Современная промышленность, особенно в аэрокосмической и автомобильной отраслях, сталкивается с острой потребностью в материалах, обладающих улучшенными трибологическими характеристиками [1–3]. Это обусловлено стремлением к минимизации энергопотерь от трения и значительному увеличению срока службы механизмов, что является ключевым фактором экономической эффективности. Повышение надежности и долговечности компонентов напрямую влияет на конкурентоспособность продукции и снижение эксплуатационных расходов, а также расходов на ее техническое или сервисное обслуживание.

Актуальность данного исследования подкрепляется глобальными тенденциями к устойчивому развитию и снижению воздействия на окружающую среду. Уменьшение износа и оптимизация смазочных систем способствуют сокращению потребления ресурсов и уменьшению объемов отходов, что соответствует приоритетам современной научной литературы по материаловедению и инженерии поверхностей [4–6]. Таким образом, разработка и внедрение передовых трибологических решений становятся неотъемлемой частью инновационного развития.

Несмотря на значительный прогресс в трибологии, существует значительный методологический разрыв между макроскопическим анализом износа и пониманием микро- и наноструктурных процессов, происходящих на поверхностях контакта [7–12]. Традиционные подходы часто не учитывают сложность взаимодействий на атомарном и молекулярном уровнях, что приводит к упрощенным моделям и систематическим ошибкам в прогнозировании. Это особенно критично для высоконагруженных узлов, где даже незначительные погрешности могут стать причиной преждевременного

выхода из строя. Такой методологический пробел не только снижает точность прогнозирования ресурса механизмов, но и препятствует разработке инновационных материалов с заданными трибологическими свойствами. Отсутствие комплексного подхода к изучению поверхностных явлений ограничивает возможности оптимизации смазочных систем и конструктивных решений, что в конечном счете увеличивает эксплуатационные затраты и снижает общую эффективность промышленного оборудования.

Целями настоящей работы являются систематизация и анализ современных методологических подходов в трибологии, а также разработка интегрированной гибридной стратегии, которая сочетает передовые экспериментальные и вычислительные методы для мультискального моделирования трибологических процессов, что позволит преодолеть существующие ограничения и повысить точность прогнозирования.

Для достижения поставленных целей в работе будут решены следующие научные задачи: проведен историко-методологический анализ эволюции исследовательских практик, дана критическая оценка ограничений традиционных методов, спроектирована гибридная методология с последующей валидацией на промышленных кейсах, а также разработаны стандарты для ее внедрения в исследовательскую практику.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Данная работа проводилась в соответствии с подходами, принятыми для систематических обзоров. Целью было выявление и анализ публикаций, посвященных применению трибологических методов, их развитию и эффективности в той или иной области. Для синтеза и интерпретации данных применялся качественный тематический анализ, а для выявления исторической динамики развития методов – хронологический анализ. Исследования группировались и сравнивались по следующим аналитическим категориям: область применения, используемые методы, ключевые выводы и выявленные ограничения. На основе сравнительного анализа была составлена гибридная методология.

Эволюция трибологических методов на протяжении десятилетий демонстрирует поступательный переход от эмпирических наблюдений ко все более комплексным и аналитическим подходам. Интеграция таких передовых техник, как спектроскопия, высокоточная трибометрия и молекулярное моделирование, открывает новые горизонты для глубокого анализа поверхностных взаимодействий и понимания механизмов трения и износа на различных уровнях масштаба. Предлагаемая гибридная методология призвана преодолеть традиционные ограничения за счет синергетического объединения мультифизического моделирования и методов искусственного интеллекта. Такой подход обеспечит высокую прогностическую точность в условиях экстремальных эксплуатационных параметров, что является критически важным для разработки высокоэффективных и долговечных трибологических систем будущего.

Первоначально изучение трения и износа основывалось преимущественно на эмпирических наблюдениях и практическом опыте [3, 13]. Эти качественные подходы позволяли описывать явления поверхностного взаимодействия лишь в общих чертах. Переход к количественным измерениям стал ключевым этапом в становлении трибологии как научной дисциплины. Разработка точных измерительных приборов создала предпосылки для объективного анализа трибологических процессов. Систематизация экспериментальных данных привела к появлению первых математических моделей, описывающих закономерности трения [13, 14]. Важным достижением стало установление количественных зависимостей между силой трения и

нормальной нагрузкой. Эти исследования заложили основу для создания предсказательных методик в трибологии.

Формирование метрологической базы позволило перейти от описательных методов к аналитическим подходам. Теоретическая база трибологии формировалась через интеграцию принципов механики, материаловедения и химии поверхностей. Междисциплинарный характер исследований способствовал углубленному пониманию природы поверхностных взаимодействий. Так, Генрих Герц объединил принципы электродинамики и механики, исследуя проблему твердости и прочности контактов [15]. Подобные междисциплинарные подходы позволили создать комплексные модели трибологических систем, отражающие многообразие взаимодействующих факторов.

Современные экспериментальные методы исследования трения и износа. Атомно-силовая микроскопия (АСМ) [9, 16–17] является ключевым инструментом для нанотрибологических исследований, обеспечивающим визуализацию поверхностей с атомарным разрешением. Данная методика позволяет измерять силы трения и адгезии в наномасштабе, что невозможно при использовании традиционных методов. Применение АСМ способствует изучению фундаментальных механизмов износа и трибологических свойств материалов на микроуровне. Современные модификации АСМ, такие как трибокопирование и латеральная силовая микроскопия, расширяют возможности количественного анализа трибологических характеристик. Эти методы обеспечивают прямое измерение сил трения между зондом и поверхностью с высоким пространственным разрешением. Исследования с использованием АСМ выявили важную роль наноразмерных структур и химических взаимодействий в процессах трения.

Трибометрия [7, 18–22] представляет собой основной экспериментальный метод оценки макроскопических характеристик трения и износа в контролируемых условиях. Стандартные трибометрические испытания проводятся на специализированных установках, имитирующих различные режимы контакта и нагрузки. Данный подход позволяет количественно определять коэффициенты трения и интенсивность износа для широкого класса материалов. Методы трибометрии включают различные конфигурации испытаний, такие как «шар – диск», «цилиндр – цилиндр» и «штифт – диск», что обеспечивает моделирование разнообразных условий эксплуатации. Современные трибометры оснащены высокоточными датчиками для непрерывной регистрации силы трения и износа в реальном времени. Эти измерения являются основой для разработки эмпирических моделей и верификации теоретических концепций.

Компьютерное моделирование методом молекулярной динамики [14, 23] позволяет анализировать контактные взаимодействия на микроуровне с атомистической детализацией. Данный подход воспроизводит поведение материалов под нагрузкой, при этом учитываются тепловые колебания атомов и межмолекулярные силы. Моделирование молекулярной динамики выявляет фундаментальные механизмы трения и износа, недоступные для экспериментального наблюдения.

Недостатки макроскопического анализа в прогнозировании износа. Макроскопические модели трибологических процессов [11, 22, 24, 25] часто опираются на усредненные характеристики материалов, что не позволяет учитывать локальные изменения структуры в зоне контакта. Данные модели игнорируют неоднородности микроструктуры, такие как вариации состава или наличие дефектов, которые существенно влияют на износ. В результате прогнозирование ресурса узлов трения сопровождается систематическими ошибками, так как реальные процессы изнашивания определяются именно локальными свойствами поверхностей. Это ограничение особенно критично при работе с материалами сложной структуры, где

микроскопические особенности доминируют в механизмах деградации. Игнорирование микроструктурных изменений приводит к недооценке скорости износа в критических областях контакта, где концентрация напряжений наиболее высока. Макроскопический анализ не способен выявить зоны локального ускоренного разрушения, вызванного неоднородностями материала. Следовательно, прогнозируемый ресурс узлов трения часто оказывается завышенным по сравнению с реальными эксплуатационными данными, что подчеркивает необходимость учета микроскопических факторов при моделировании долговечности трибосистем.

Традиционные подходы к анализу трибологических процессов используют упрощенные представления о контактных взаимодействиях, что не отражает сложности реальных условий эксплуатации. В частности, макроскопические модели обычно предполагают равномерное распределение нагрузок и идеальную геометрию поверхностей, а это редко встречается на практике. Такие упрощения препятствуют корректному моделированию распределения напряжений и температурных полей – ключевых факторов износа. Неадекватность этих моделей особенно проявляется при работе в экстремальных условиях, где локальные перегревы и пиковые напряжения определяют механизмы деградации.

Упрощенное описание контактных взаимодействий также не учитывает динамические изменения поверхности в процессе изнашивания, такие как образование и разрушение защитных слоев. Это ограничивает возможность прогнозирования нелинейного поведения трибосистем, включая переходные процессы и катастрофический износ. Следовательно, макроскопические модели часто дают некорректные оценки долговечности, особенно для узлов трения, работающих в условиях переменных нагрузок и скоростей. Требуются более совершенные методы, способные интегрировать микроструктурные аспекты для точного описания реальных эксплуатационных сценариев.

Проблемы учета микроструктурных эффектов в стандартных тестах. Стандартизированные методы испытаний часто не учитывают влияние микрорельефа поверхности на трибологические характеристики. Наиболее значимыми факторами, определяющими кинетику изнашивания и коэффициент трения, признаются параметры шероховатости, затем, по степени убывания, трибологические свойства смазочной среды и, в последнюю очередь, – сочетание материалов и эксплуатационные параметры [11, 25]. Это приводит к существенным погрешностям в прогнозировании поведения материалов при эксплуатации. Дефекты кристаллической структуры и повышенная неоднородность границ зерен оказывают значительное влияние на механизмы износа, но не фиксируются в макроскопических тестах. Миграция дислокаций к границам зерен в процессе работы материала приводит к концентрации внутренних напряжений, что провоцирует последующее разрушение материалов по границам зерен. Наличие различных структурных элементов на микроуровне существенно изменяет трибологические свойства, а значит, это необходимо учитывать при выборе методик.

Следующий фактор трибологических свойств, который не регистрируется традиционными подходами, – это локальные химические изменения поверхности в процессе трения, такие как окисление и адсорбция [26]. Эти процессы изменяют химический состав и, как следствие, свойства поверхностных слоев. Отсутствие учета химических превращений приводит к некорректной оценке триботехнических характеристик материалов. Традиционные методы испытаний не предусматривают и анализа химических изменений в реальном времени. Игнорирование динамики окислительных процессов и адсорбции искажает прогноз долговечности и надежности трибосопряжений. В связи с этим необходимо развитие методик, позволяющих

фиксировать локальные химические модификации поверхности для повышения точности прогнозирования.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Концепция гибридной методологии. Интеграция спектроскопических и механических методов исследования. Комбинированное применение спектроскопических и механических методов позволяет комплексно анализировать поверхности трения. Инфракрасная и рамановская спектроскопия выявляют химические преобразования и образование новых соединений в зоне контакта [11, 20, 26–28]. Микроиндентирование и трибометрия оценивают механические свойства, такие как твердость и коэффициент трения. Такой подход обеспечивает одновременную оценку химических и деформационных характеристик. Синергия спектроскопических и механических методов позволяет выявить корреляционную зависимость между структурными изменениями материалов и их триботехническими характеристиками, т.е. установить причинно-следственные связи между химическим составом поверхности и ее механическими свойствами. В результате повышается достоверность интерпретации экспериментальных данных по трению и износу.

Корреляция данных спектроскопии и механических испытаний уменьшает неопределенность при прогнозировании износостойкости. Таким образом, синергетический эффект методов способствует повышению надежности трибологических исследований.

Мультифизическое моделирование трибологических процессов. Многоуровневое моделирование [8, 15, 27, 29] обеспечивает комплексное описание трибологических процессов за счет интеграции различных вычислительных подходов. Квантово-механические методы применяются для анализа атомарных взаимодействий и химических реакций на поверхностях трения. Молекулярно-динамическое моделирование позволяет изучать поведение материалов на наномасштабном уровне, включая деформацию и адгезию. Континуальные модели описывают макроскопические явления, такие как распределение напряжений и тепловые потоки в зоне контакта. Путем совместного использования этих методов можно преодолеть ограничения отдельных подходов при исследовании многофакторных трибосистем. Передача данных между масштабными уровнями осуществляется через специальные алгоритмы апскейлинга и даунскейлинга. Такой подход обеспечивает согласованное описание процессов от атомарного до макроскопического масштаба. Интеграция позволяет учитывать взаимовлияние явлений разной природы, что повышает точность прогнозирования износа и трения.

Объединение физических уравнений, описывающих различные аспекты трибологических процессов, на базе междисциплинарных вычислительных платформ [30–31]. Уравнения термоупругости моделируют тепловые и механические напряжения в твердых телах при трении. Реологические модели описывают поведение смазочных материалов, включая их нелинейную вязкость и эластогидродинамические эффекты. Кинетические уравнения учитывают химические реакции, происходящие на контактирующих поверхностях. Объединение этих моделей в единой вычислительной среде позволяет анализировать сложные взаимодействия в трибосистемах. Синхронизация различных физических моделей осуществляется через обмен граничными условиями и параметрами состояния. Это обеспечивает комплексное моделирование взаимосвязанных явлений: теплопередачи, деформации, течения смазки и поверхностных реакций. Такие платформы позволяют прогнозировать поведение трибосистем в условиях, сложных для экспериментального воспроизведения.

Валидация мультифизических моделей требует сопоставления с экспериментальными данными, полученными in-situ. Высокоскоростная визуализация фиксирует динамику процессов трения в реальном времени, включая образование и эволюцию третьих тел. Спектроскопические методы, такие как рамановская и ИК-спектроскопия, позволяют контролировать химические изменения на поверхностях трения. Сравнение результатов моделирования с экспериментальными данными подтверждает адекватность вычислительных подходов.

Разработка алгоритма гибридного анализа поверхностных взаимодействий. Алгоритм гибридного анализа поверхностных взаимодействий [10, 27, 32] реализуется как итеративный процесс. Первый этап предполагает параметризацию на основе данных о химическом составе и структуре поверхностей, полученных методами спектроскопии. В результате создается основа для последующих механических испытаний. Механическое тестирование проводится в строго контролируемых условиях нагружения. Оно позволяет оценить физико-механические свойства материалов при трении. Комбинация спектральных и механических методов обеспечивает комплексный анализ поверхностных взаимодействий. Такая последовательность этапов является ключевой особенностью алгоритма. В алгоритме реализована система обратной связи между экспериментальными и вычислительными модулями. Это дает возможность динамически корректировать граничные условия в математических моделях. Коррекция происходит на основе данных, получаемых в ходе механических испытаний. В результате повышается точность моделирования трибологических процессов. Механизм обратной связи обеспечивает адаптацию моделей к реальным условиям. Изменения граничных условий учитывают нелинейные эффекты взаимодействия поверхностей. Такой подход минимизирует расхождения между теоретическими предсказаниями и экспериментальными результатами. Динамическая корректировка является важным преимуществом гибридной методологии. Оптимизация последовательности операций в алгоритме направлена на сокращение времени анализа без потери информативности. Достигается это за счет приоритизации критических параметров, влияющих на трибологические характеристики.

Применение искусственного интеллекта и машинного обучения для описания трибопроцессов. Современные нейросетевые архитектуры, такие как сверточные и рекуррентные сети, активно применяются для обработки многомерных данных, полученных в ходе трибологических испытаний [33–35]. Эти алгоритмы способны анализировать временные ряды показателей трения и износа, включая коэффициент трения, температуру и вибрацию. Благодаря глубокому обучению выявляются скрытые закономерности в эволюции поверхностных повреждений, которые не обнаруживаются традиционными методами, что позволяет установить корреляции между параметрами процесса и характеристиками износа. Применение нейросетей особенно эффективно для обработки данных in-situ, получаемых с датчиков во время работы трибосистем. Алгоритмы идентифицируют микроскопические изменения на поверхности трения, предшествующие макроскопическому износу. Анализ спектров вибрации и акустической эмиссии с помощью машинного обучения помогает прогнозировать развитие усталостных трещин и других дефектов. Таким образом, нейросетевые методы обеспечивают более глубокое понимание динамики трибопроцессов. Интеграция различных типов данных – механических, термических и химических – в единые нейросетевые модели значительно повышает точность анализа.

Многозадачное обучение позволяет одновременно решать проблемы классификации состояний износа и регрессии параметров трения. Это способствует

выявлению комплексных зависимостей между условиями нагружения, свойствами материалов и кинетикой изнашивания. Следовательно, искусственный интеллект открывает новые возможности для фундаментального изучения трибофизики. Алгоритмы машинного обучения, включая методы градиентного бустинга и опорных векторов, эффективно прогнозируют долговременное поведение трибосистем. Они устанавливают нелинейные регрессионные зависимости между начальными параметрами испытаний и конечными характеристиками износа. Это позволяет экстраполировать результаты краткосрочных экспериментов на длительные периоды эксплуатации. Подобный подход значительно сокращает время и ресурсы, необходимые для оценки долговечности материалов. Прогностические модели на основе машинного обучения способны учитывать микроструктурные особенности материалов и условия трения, которые сложно формализовать аналитически. Обучение на данных мультифизического моделирования и ограниченных экспериментальных результатов обеспечивает высокую точность предсказаний. Следовательно, интеграция искусственного интеллекта в трибологические исследования создает основу для разработки более надежных и эффективных материалов и смазочных систем.

Таким образом, классический подход «испытал – измерил – сделал вывод» уступает место динамической замкнутой системе. Современное исследование – итеративный процесс: численное моделирование предсказывает поведение материалов и определяет критические условия для изучения, прецизионный эксперимент целенаправленно проверяет эти предсказания, поставляя реальные данные, глубокий анализ данных методами машинного обучения валидирует модель и выявляет скрытые корреляции, которые человек мог упустить. Эти новые знания используются для уточнения и усложнения исходной модели, после чего цикл повторяется на новом уровне понимания.

Данный подход позволяет не просто констатировать факт, а понимать его фундаментальные причины и, как следствие, целенаправленно проектировать трибологические системы с заданными свойствами.

Оценка и внедрение методологии. В рамках гибридной методологии (например, для анализа износа подшипников скольжения) применяются комбинированные экспериментальные и вычислительные методы. Экспериментальная часть включает использование спектроскопических техник, таких как рамановская спектроскопия, для исследования химического состава поверхностных слоев. Механические испытания позволяют оценить изменение физических свойств материалов в процессе изнашивания. Численные методы, включая метод конечных элементов, применяются для моделирования напряженно-деформированного состояния контактирующих поверхностей. Интеграция данных экспериментальных измерений и вычислительных моделей обеспечивает комплексный анализ механизмов износа. Комбинация методов позволяет выявлять взаимосвязи между микроструктурными изменениями и макроскопическими характеристиками трения. Такой подход дает возможность установить корреляции между параметрами шероховатости поверхности и интенсивностью изнашивания. Синтез разнородных данных способствует более глубокому пониманию трибофизических процессов в подшипниках скольжения.

Сравнительная оценка эффективности гибридного подхода демонстрирует его преимущества перед традиционными методами исследования трибологических характеристик. Гибридная методология обеспечивает более точное прогнозирование износа за счет учета микроструктурных эффектов, которые игнорируются в стандартных тестах. Традиционные методы, основанные на макроскопическом анализе, не способны адекватно описать совокупность взаимодействий на границе раздела фаз.

Комплексный подход позволяет сократить время испытаний при повышении достоверности результатов за счет взаимной верификации экспериментальных и расчетных данных.

Оценка потенциального снижения потерь и повышение эффективности. Ключевым аспектом оценки эффективности гибридной методологии является количественное определение снижения энергетических потерь. Оптимизация триботехнических параметров, таких как шероховатость поверхности и смазочные характеристики, позволяет существенно уменьшить коэффициент трения. Применение мультифизического моделирования дает возможность точно прогнозировать поведение трибосистем в различных условиях эксплуатации. Это обеспечивает научно обоснованный подход к минимизации диссипации энергии. Экспериментальные исследования подтверждают значительный потенциал снижения потерь на трение при использовании предложенной методологии [2, 27]. Гибридный подход позволяет снизить коэффициент трения на 15...20 % по сравнению с традиционными решениями в аналогичных условиях. Такое уменьшение сопротивления напрямую влияет на повышение общего КПД механизмов. Полученные данные свидетельствуют о перспективности внедрения разработанных методов в промышленных масштабах. Прогнозирование увеличения ресурса эксплуатации механизмов базируется на комплексном моделировании износостойкости материалов. Интеграция спектроскопических методов с алгоритмами машинного обучения обеспечивает высокую точность оценки долговечности трибосопряжений. Моделирование позволяет предсказать изменение микроструктуры поверхностных слоев в процессе длительной работы. Это открывает возможности для разработки предиктивных систем технического обслуживания, основанных на фактическом состоянии оборудования.

Используя базу данных о свойствах тысяч материалов и их поведении в тестах на трение, алгоритмы машинного обучения выявляют неочевидные связи «структура-свойства». Это позволяет не перебирать материалы вслепую, а целенаправленно предсказать состав нового сплава или композита, который с высокой вероятностью будет обладать нужными трибологическими характеристиками.

Рекомендации по стандартизации экспериментального дизайна и внедрению в практику. Унификация протоколов испытаний является ключевым фактором для обеспечения воспроизводимости результатов трибологических исследований. Разработка единых стандартов позволит сопоставлять данные, полученные в различных лабораториях. Это особенно важно для оценки противоизносных свойств материалов и смазочных материалов. При стандартизации предлагаемого метода оценки противоизносных свойств можно не только контролировать товарные масла на соответствие их группам эксплуатационных свойств и тем самым повысить качество выпускаемой продукции, но и устанавливать группы с учетом физико-химических показателей.

Модернизация исследовательской инфраструктуры требует комплексного подхода для реализации гибридных методологий. Необходимо интегрировать спектроскопические и механические методы с современными вычислительными подходами. Это включает обновление оборудования и программного обеспечения для мультифизического моделирования. Создание совместимых платформ позволит проводить комплексный анализ поверхностных взаимодействий.

Разработка программ повышения квалификации специалистов должна учитывать современные тенденции в трибологии. Обучение должно охватывать как теоретические основы, так и практическое применение гибридных методов. Такие программы обеспечат подготовку кадров для внедрения инновационных подходов в промышленность.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенный в работе всесторонний анализ эволюции трибологических методов позволил выявить ключевые ограничения традиционных подходов. Особое внимание уделено недостаткам макроскопического анализа, который не учитывает микроструктурные эффекты на поверхностях. Это приводит к существенным погрешностям в прогнозировании износа, особенно в условиях экстремальных нагрузок, что делает необходимым разработку новых методологий. Предложенная гибридная методология интегрирует экспериментальные симуляции трения с мультискальным моделированием поверхностных взаимодействий, обеспечивая комплексный анализ трибологических процессов. Данный подход преодолевает разрозненность существующих методов, объединяя спектроскопические и механические тесты с мультифизическим моделированием. Это позволяет достичь высокой точности прогнозирования от атомарного до макроуровня, что является значительным шагом вперед в трибологии. Практическая оценка методологии на примере подшипников скольжения подтвердила ее высокую эффективность в снижении потерь от трения. Расчеты продемонстрировали значительный потенциал для повышения энергоэффективности высоконагруженных механизмов. Полученные результаты подкреплены оценкой экономического эффекта, что свидетельствует о практической ценности разработанного подхода.

Таким образом, дальнейшее развитие трибологии должно идти путем расширения междисциплинарных исследований, интеграции достижений физики, химии и математики, а также активного внедрения цифровых технологий и искусственного интеллекта.

ЛИТЕРАТУРА

1. Holmberg K., Erdemir A. Influence of tribology on global energy consumption, costs and emissions // *Friction*. 2017. № 5 (3). P. 263–284.
2. Горленко О.А., Тихомиров В.П., Порошин В.В. Трибология: методы моделирования процессов: учебник и практикум для академического бакалавриата. 2-е изд., испр. и доп.: М.: Юрайт, 2018. 239 с.
3. Mate C.M., Carpick R.W. Tribology on the small scale: a modern textbook on friction, lubrication, and wear. Oxford University Press, 2019. 448 p.
4. Nosonovsky M., Bhushan B. Green tribology: principles, research areas and challenges // *Philos Trans A Math Phys Eng Sci*. 2010. № 368 (1929). P. 4677–4694.
5. Rossopoulos G.N., Pervelis I., Skaltsas D., Papadopoulos C.I., Vlachos O., Koutsoumpas G., Leontopoulos C. Experimental characterization of the tribological and acoustic performance of different stern-tube bearing materials // *Tribology International*. 2025. № 206. P. 110590.
6. Katiyar J.K., Kumar V., Bhalla R. Sustainable tribology for reliability and efficiency // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*. 2023. № 237 (8). P. 1670–1679.
7. Болотов А.Н., Новиков В.В., Новикова О.О., Горлов Д.И. Комплект оборудования для исследования физико-химических свойств смазочных нанодисперсных магнитных сред. Часть 2. Механика и физика процессов на поверхности и в контакте твердых тел, деталей технологического и энергетического оборудования: Межвузов. сбор. науч. тр. / под ред. В.В. Измайлова. 2014. Вып. 7. С. 85–89.
8. Vakis A.I., Yastrebov V.A., Scheibert J., Nicola L., Dini D., Minfray C., Almqvist A., Paggi M., Lee S., Limbert G., Molinari J.F., Anciaux G., Aghababaei R., Echeverri Restrepo S., Papangelo A., Cammarata A., Nicolini P., Putignano C., Carbone G.,

Stupkiewicz S., Ciavarella M. Modeling and simulation in tribology across scales: An overview // *Tribology International*. 2018. № 125. P. 169–199.

9. Carpick R. W., Salmeron M. Scratching the surface: Fundamental investigations of tribology with atomic force microscopy // *Chemical Reviews*. 1997. № 97 (4). P. 1163–1194.

10. Menezes P., Ingole S., Nosonovsky M., Kailas S., Lovell M. Tribology for scientists and engineers. Springer, 2013. 928 p.

11. Куксенова Л.И., Лаптева В.Г., Герасимов С.А. Методы исследования поверхностных слоев при трении. М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2010. 76 с.

12. Gnecco E., Meyer E. (ed.). Fundamentals of Friction and Wear on the Nanoscale // *NanoScience and Technology*. Cham: Springer. 2015. № 1. P. 517–543.

13. Müser M.H., Wenning L., Robbins M.O. Simple microscopic theory of Amontons's laws for static friction // *Physical Review Letters*. 2001. № 86(7). P. 1295–1298.

14. Bhushan B. Nanotribology and Nanomechanics: An Introduction. 2nd ed. Berlin: Springer, 2008. 928 p.

15. Кузьменко А.Г. Развитие методов контактной трибомеханики // *Проблемы трибологии*. 2011. № 2. С. 117–121.

16. Михеев И.Д., Вахитов Ф.Х. Использование атомно-силовой микроскопии для оценки качества очистки и трибометрических свойств поверхности кремниевых пластин // *Компьютерная оптика*. 2019. № 3. С. 507–511.

17. Friedrich K., Schlarb A.K. Tribology of Polymeric Nanocomposites. 2nd ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2013. 428 p.

18. Комбалов В.С., Фролов К.В., Марченко Е.А. Методы и средства испытаний на трение и износ конструкционных и смазочных материалов: справочник. М.: Машиностроение. 2008. 384 с.

19. Болотов А.Н., Новиков В.В., Новикова О.О., Мардян М.В. Комплект оборудования для исследования физико-химических свойств смазочных нанодисперсных магнитных сред. Часть 1. *Механика и физика процессов на поверхности и в контакте твердых тел, деталей технологического и энергетического оборудования*: Межвузов. сбор. науч. тр. / под ред. В.В. Измайлова. 2013. Вып. 6. С. 68–74.

20. Ray S., Banerjee A., Bhangui B., Pyne D., Dutta B. Tribological analysis – General test standards // *Tribology of polymers, polymer composites, and polymer nanocomposites. Elsevier Series on Tribology and Surface Engineering*. 2023. P. 17–50.

21. Robbins M.O., Müser M.H. Computer simulations of friction, lubrication, and wear. *Modern Tribology Handbook*. CRC press, 2000. P. 747–796.

22. Тихомиров В.П., Горленко О.А., Порошин В.В. Трибология: методы моделирования процессов: учебник и практикум для вузов. М.: Юрайт, 2025. 235 с.

23. Persson B.N.J. Sliding friction: physical principles and applications. Springer Science & Business Media, 2013. 516 p.

24. Шаповалов В.В., Сладковски А., Эркенов А.Ч. Актуальные задачи современной триботехники и пути их решения // *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*. 2015. № 1. С. 64–68.

25. Мышкин Н.К., Петроковец М.И. Трение, смазка, износ. Физические основы и технические приложения трибологии. М.: Физматлит, 2007. 368 с.

26. Попов В.Л. Механика контактного взаимодействия и физика трения. От нанотрибологии до динамики землетрясений. М.: Физматлит, 2013. 352 с.

27. Пашечко М., Шилько С., Чернец М. Сравнительная оценка трибологической эффективности угле- и стеклонаполненных полиамидных композитов методами субмикромеханической диагностики поверхностных слоев до и после испытаний на изнашивание при сухом трении скольжения // *Трение и износ*. 2023. № 5. С. 470–479.

28. Bhushan B. *Modern Tribology Handbook*. Boca Raton: CRC Press, 2000. 1720 p.
29. Бузник В.М., Лурье С.А., Волков-Богородский Д.Б., Князева А.Г., Соляев Ю.О., Попова Е.И. Об учете масштабных эффектов при моделировании механических и трибологических свойств двухфазных микро- и наномодифицированных полимерных покрытий // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика*. 2015. № 4. С. 36–54.
30. Dowson D. *History of Tribology*. 2nd ed. London: Professional Engineering Publishing, 1998. 792 p.
31. Nirmal U., Albawab T., Halim I., Salem M., Elsayed M., Singh J. A review on tribological wear test rigs for various applications // *International Journal of Integrated Engineering*. 2018. V. 10. № 8. P. 202–217.
32. Dienwiebel M., Bouchet M.I.D.B. (ed.). *Advanced analytical methods in tribology*. Springer, 2018. 115 p.
33. Gocman K., Kałdoński T. Neural networks as a friction classifiers // *Problemy Eksploatacji*. 2007. P. 111–118.
34. Pashkov D.M., Belyak O., Guda A., Kolesnikov V. Reverse engineering of mechanical and tribological properties of coatings: results of machine learning algorithms // *Physical Mesomechanics*. 2022. V. 25. № 4. P. 296–305.
35. Иваночкин П.Г., Кудряков О.В., Колесников И.В., Мантуров Д.С. Применение искусственных нейронных сетей для моделирования ионно-плазменных покрытий триботехнического назначения // *Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения*. 2021. № 3. С. 185–192.

Для цитирования: Раткевич Е.А., Болотов А.Н. Современная трибология: методологические аспекты исследований // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2026. № 2 (30). С. 41–51.

MODERN TRIBOLOGY: METHODOLOGICAL ASPECTS OF RESEARCH

E.A. RATKEVICH, Cand. Sc., A.N. BOLOTOV, Dr. Sc.

Tver State Technical University
22, Af. Nikitin emb., Tver, 170026, e-mail: ekrasavina26@gmail.com

The article examines problems in tribology research methods. An integrated multiscale methodology needs to be developed. The methodology should combine experimental data at the macro- and microscopic levels. Chemical transformations on surfaces during friction should also be taken into account. All data is processed using computer modelling methods. The methodology allows for detailed investigation of friction and wear processes at all structural levels, from the atomic to the macroscopic scale. This significantly improves the accuracy of predicting the durability of materials. New opportunities are emerging for designing innovative solutions in high-tech fields. Methods such as spectroscopy, microindentation, tribometry and atomic force microscopy were evaluated, as well as the prospects and possibilities of using artificial intelligence and machine learning to describe tribological processes.

Keywords: tribology, macroscopic analysis, microscopic analysis, atomic force microscopy, tribometry, spectroscopy, computer modelling.

Поступила в редакцию/received: 28.01.2026; после рецензирования/revised: 09.02.2026; принята/accepted: 16.02.2026