

**ПОВЫШЕНИЕ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ДОРОЖНО-СТРОИТЕЛЬНОЙ  
ТЕХНИКИ ТРИБОТЕХНИЧЕСКИМ МОДИФИЦИРОВАНИЕМ  
ПОВЕРХНОСТЕЙ УЗЛОВ ТРЕНИЯ**

**IMPROVING THE DURABILITY OF ROAD CONSTRUCTION  
TRIBOTECHNICAL MODIFICATION TECHNIQUES SURFACES  
OF FRICTION UNITS**

**Иванов Владимир Петрович,**  
*доктор технических наук, профессор,  
Полоцкий государственный университет,  
профессор кафедры «Автомобильный транспорт»,  
Новополоцк, Республика Беларусь*  
**Ivanov Vladimir Petrovich,**  
*doctor of technical Sciences, Professor,  
Polotsk state University,  
Department of Automobile transport,  
Novopolotsk, Republic of Belarus*

e-mail: [ivprem@tut.by](mailto:ivprem@tut.by)

**Дудан Александр Витальевич,**  
*кандидат технических наук, доцент,  
Полоцкий государственный университет,  
декан механико-технологического факультета,  
Новополоцк, Республика Беларусь*  
**Dudan Aleksandr Vitalievitsch,**  
*Cand. Techn. Scie., Polotsk state University,  
Department of Automobile transport,  
Novopolotsk, Republic of Belarus*

e-mail [a.dudan@psu.by](mailto:a.dudan@psu.by)

**Вигерина Татьяна Владимировна,**  
*кандидат технических наук, доцент,  
Полоцкий государственный университет,  
заведующий кафедры «Автомобильный транспорт»,  
Новополоцк, Республика Беларусь*  
**Vigerina Tatyana Vladimirovna,**  
*Cand. Techn. Scie., Polotsk state University,  
Department of Automobile transport,  
Novopolotsk, Republic of Belarus*

e-mail: [t.vigerina@psu.by](mailto:t.vigerina@psu.by)

*Научная специальность:*  
**05.22.10 – Эксплуатация автомобильного транспорта**  
*Scientific specialty:*  
**05.22.10 – Operation of road transport**

В статье установлено влияние контактного давления на триботехнические свойства фрикционной пары в условиях граничного трения пары «бронза – сталь» со смазочным материалом, модифицированного добавками ультрадисперсной алмазграфитовой шихты. Это влияние эффективно проявляется при контактном давлении свыше 20 МПа. Модифицированную смазку достаточно применять только на стадии приработки, поскольку использование после подобной приработки смазки Литол-24 обеспечивает низкий коэффициент трения ( $f = 0,04 - 0,05$ ) практически при отсутствии износа. Нарботка образцов с комплексной литиевой смазкой и ультрадисперсной алмазграфитовой шихтой превышает на 20 – 30 % соответствующий показатель при работе со смазкой Литол-24 стандартного состава.

The article establishes the effect of contact pressure on the tribotechnical properties of a friction pair under the conditions of boundary friction of a pair "bronze – steel" with a lubricant modified with additives of ultradispersed diamond-graphite charge. This effect is effectively manifested at contact pressures above 20 MPa. It is sufficient to apply the modified grease only at the running-in stage, since the use of Litol-24 grease after such a running-in provides a low coefficient of friction ( $f = 0,04 - 0,05$ ) with practically no wear. The operating time of samples with a complex lithium grease with ultradispersed diamond-graphite charge exceeds the corresponding indicator by 20 – 30 % when working with Litol-24 grease of standard composition.

**Ключевые слова:** долговечность, изнашивание, трибомодифицирование, смазка, алмазсодержащие компоненты.

**Keywords:** durability, wear, tribomodification, lubrication, diamond-containing components.

До 90 % деталей, составляющих трущиеся соединения, достигают предельного состояния по причине изнашивания [1], поэтому снижение интенсивности изнашивания трущихся пар является существенным фактором повышения наработки (срока службы) машин.

Трибомеханическое модифицирование представляет собой финишную операцию обработки поверхностей, предназначенную для окончательного формирования необходимого структурно-фазового состояния рабочей поверхности. Оно рекомендуется для применения преимущественно в тяжело нагруженных узлах трения скольжения (подшипники скольжения, опоры, направляющие и др.), работающих в экстремальных условиях, в условиях высоких нагрузок и вибраций (карьерная техника, железнодорожный транспорт, строительно-дорожные машины, сельскохозяйственная техника, дробилки, грохоты), для повышения нагрузочной способности узлов и деталей, подвер-

женных интенсивному изнашиванию (штоки, подшипники коленчатых валов, поршни, цилиндры двигателей внутреннего сгорания и др.) [2].

Одним из эффективных способов трибомодифицирования поверхностей трения является применение модифицированных смазок с введением в их состав функциональных добавок. В настоящее время все большую актуальность приобретает использование в качестве подобных добавок наноразмерных алмазосодержащих компонентов. Важной задачей при этом является выбор таких параметров и критериев процесса трибомеханического модифицирования, чтобы в условиях эксплуатации машин стабильно получать рабочие поверхности деталей с заданными свойствами [3].

Цель работы – обоснование условий использования смазок с наноразмерными алмазосодержащими компонентами, обеспечивающими снижение интенсивности изнашивания поверхностей в узлах трения, испытывающих высокие нагрузки.

Исследуемые образцы изготовлены из бронзы БрБ2 ГОСТ 18175–78 и представляют собой стержни диаметром 10 и длиной 15 мм. В качестве контртела был выбран диск из закаленной стали 45 диаметром 70 и высотой 6 мм.

Триботехнические испытания проводились на универсальной машине трения ММW-1А вертикального типа с компьютерным управлением. Машина поддерживала постоянную силу на поверхности контакта в течение эксперимента с отклонением  $\pm 2$  Н. Относительная погрешность измерения силы трения не превышала  $\pm 2$  % при жидкостном режиме смазывания.

Перед проведением исследования для повышения точности эксперимента производилась подготовка рабочих поверхностей образцов: для уменьшения шероховатости их полировали наждачной бумагой зернистостью Р600.

В процессе испытаний измерялись сила трения и коэффициент трения с частотой один раз в 1 с. в режиме реального времени с возможностью сохранения в файл. Полученные данные аккумулировались в графическом и текстовом виде и после аппроксимации подвергались анализу.

Интенсивность изнашивания оценивалась массовым износом на аналитических весах AS 60/220/C/2/N после прохождения каждых 500 м пути трения.

Для определения зависимости влияния нагрузочно-скоростных режимов трибовзаимодействия была использована пластичная приработочная комплексная литиевая смазка третьего поколения OIMOL KL R 2 с ультрадисперсной алмазоуглеродной шихтой (УАШ) с концентрацией наноалмазов в шихте 0,5 % по массе. В качестве базовой смазки была выбрана серийно выпускаемая пластичная смазка Литол-24 (ГОСТ 21150–87).

Режимы трения при испытании образцов:

- контактное давление 10 – 40 МПа;

- скорость скольжения 0,15 м/с;
- путь трения 500 – 3000 м.

Результаты испытаний, приведенные на рисунке 1, показывают, что влияние модифицирующей добавки в смазке на процессы изнашивания существенно зависит от контактного давления.

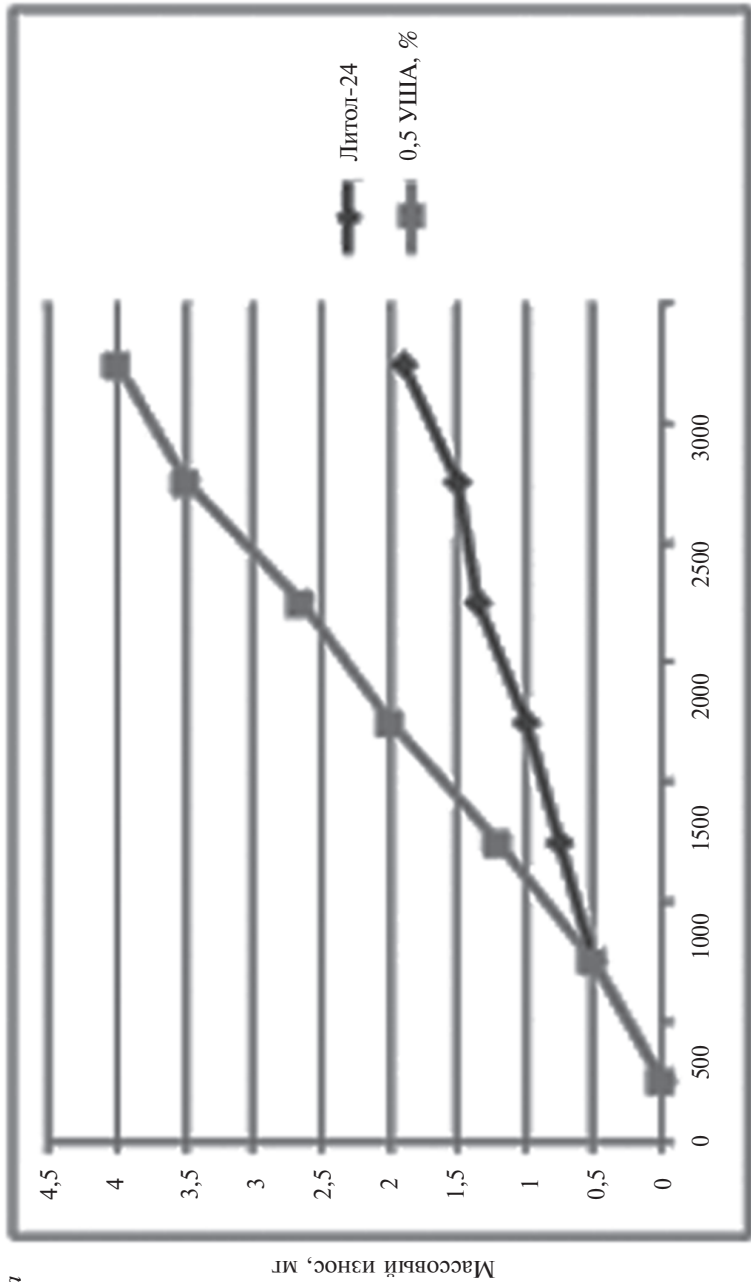
При относительно низком номинальном контактном давлении ( $p_a = 10$  МПа) износ образцов бронза БрБ2 при трении в среде модифицированной смазки существенно превышает (примерно в 2 раза) износ образцов, испытываемых в смазке Литол-24 (рисунок 1,а). Коэффициент трения пары, работающей в среде модифицированной смазки (рисунок 1,б), на начальных стадиях испытаний составляет  $f = 0,10 - 0,14$ , и затем, по мере увеличения пути трения  $l$ , регистрируется постепенное снижение значений коэффициента трения до  $f = 0,087 - 0,084$  (1 500 – 1 000 м) и до  $f = 0,075$  (1 500 – 3 000 м). Указанное изменение коэффициента трения с увеличением пути трения  $l$  связано с процессами приработки фрикционной пары.

В случае применения смазки Литол-24 ход зависимости коэффициента трения от пути трения подобен описанному выше ходу зависимости для смазки с УАШ. Вместе с тем значения коэффициента трения на последующих стадиях испытаний превышают соответствующие значения  $f$  для случая испытаний со смазкой, содержащей УАШ, при этом фиксируется более низкое значение массового износа бронзы.

Увеличение контактного давления до  $p_a = 20$  МПа приводит к сближению зависимостей массового износа бронзы от пути трения для случаев испытаний в среде модифицированной смазки и смазки Литол-24 (рисунок 1,в). Вместе с тем следует отметить, что при испытаниях смазки с добавками УАШ интенсивность изнашивания испытываемых образцов после пути трения  $l = 2500$  м резко падает. На этой же стадии испытаний (рисунок 1,г) регистрируется и существенное снижение значений коэффициента трения ( $f = 0,068$ ). При использовании смазки Литол-24 интенсивность изнашивания бронзы на протяжении испытаний сохраняется на высоком уровне, а значения коэффициента трения на дальнейших стадиях испытаний даже несколько возрастают и достигают значений 0,110 – 0,117.

В случае испытаний с контактным давлением 40 МПа комплексной литевой смазки с УАШ приводит к существенному снижению интенсивности изнашивания поверхности трения по сравнению с аналогичными испытаниями в среде немодифицированной смазки (рисунок 1,д), а значения коэффициента трения уменьшаются до 0,136 уже на ранних стадиях испытаний (рисунок 1,е). Фрикционные испытания в среде смазки Литол-24 с высоким контактным давлением ( $p_a = 40$  МПа) сопровождаются быстрой интенсификацией процессов изнашивания и увеличением

*a*



Путь трения, м

*a, б* – 10 МПа; *в, г* – 20 МПа; *д, е* – 40 МПа

Рисунок 1, *a* – Зависимость массового износа образца бронзы БрБ2 (*a, в, д*) и коэффициента трения в соединении (*б, г, е*) от пути трения при различном контактом давлении

б

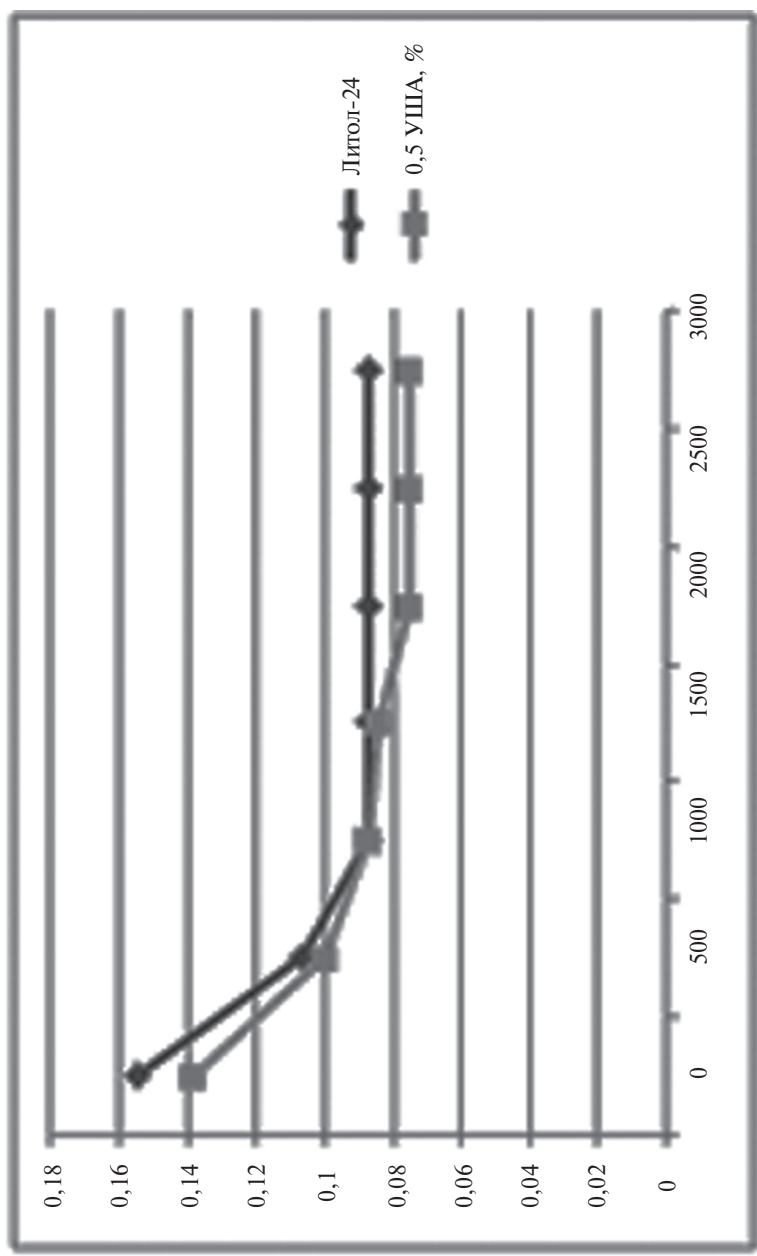
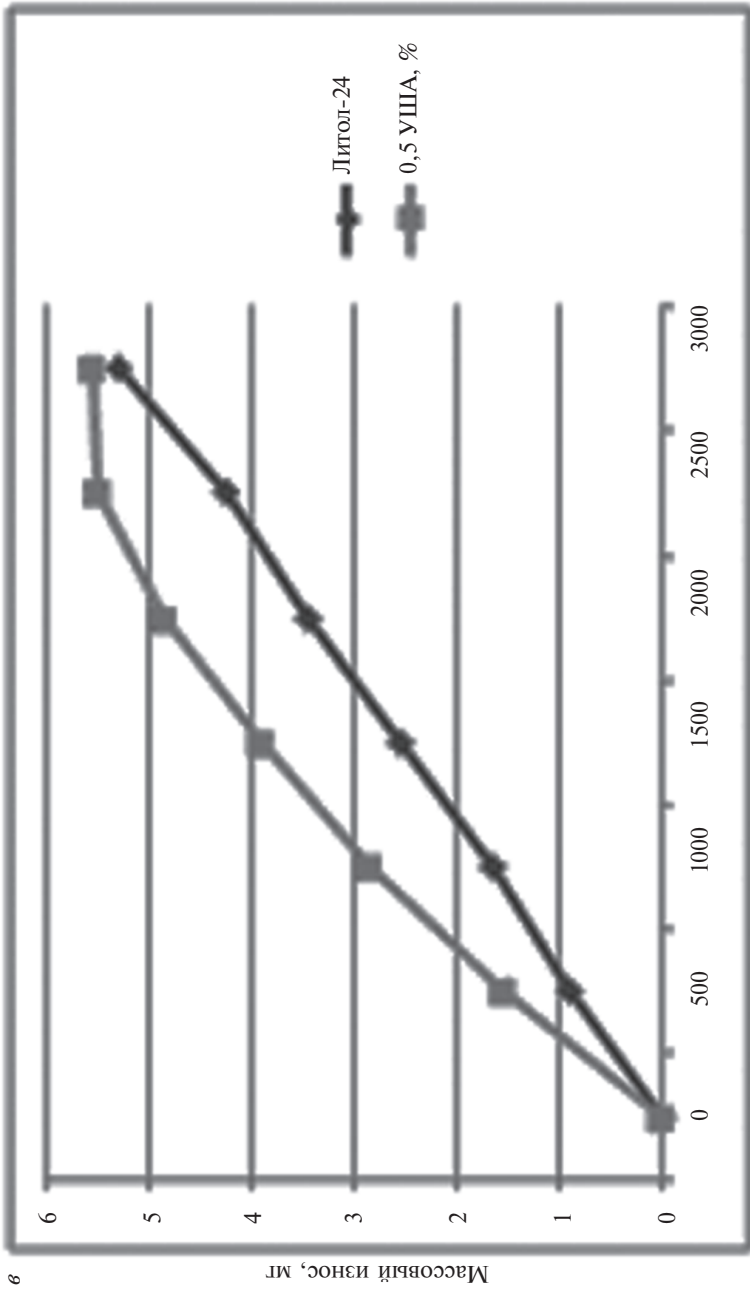
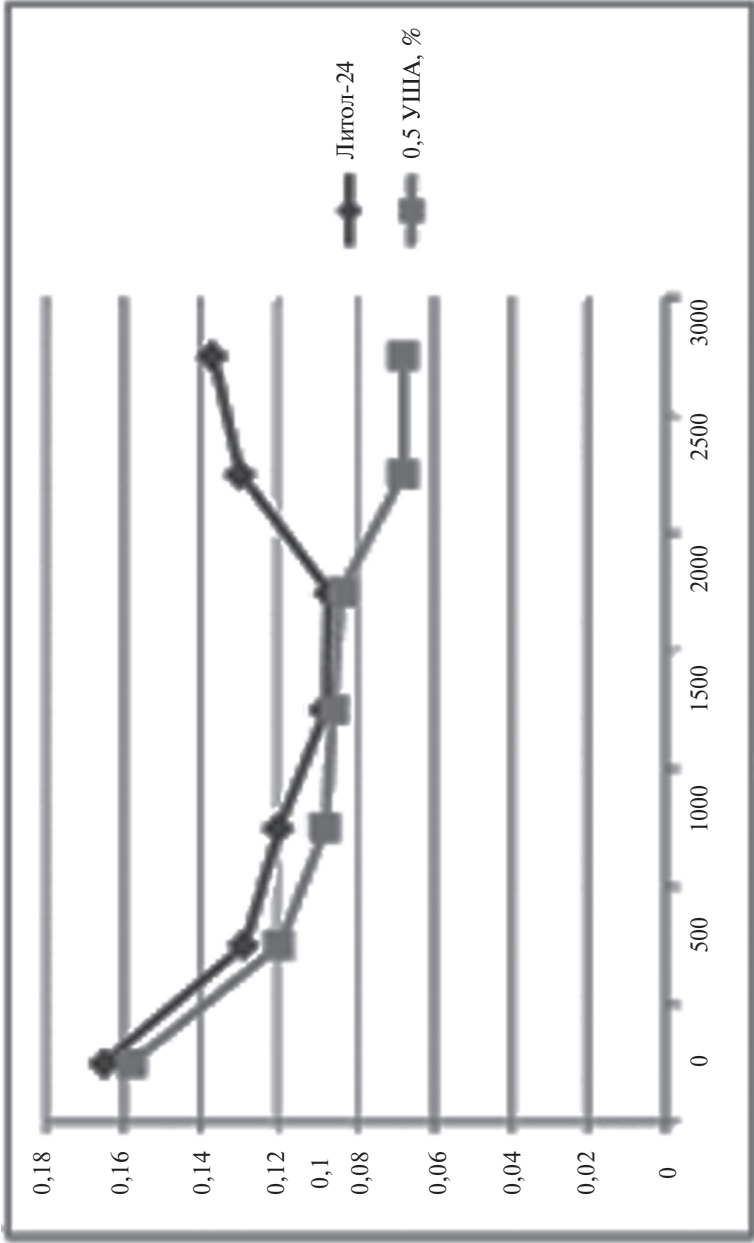


Рисунок 1,б

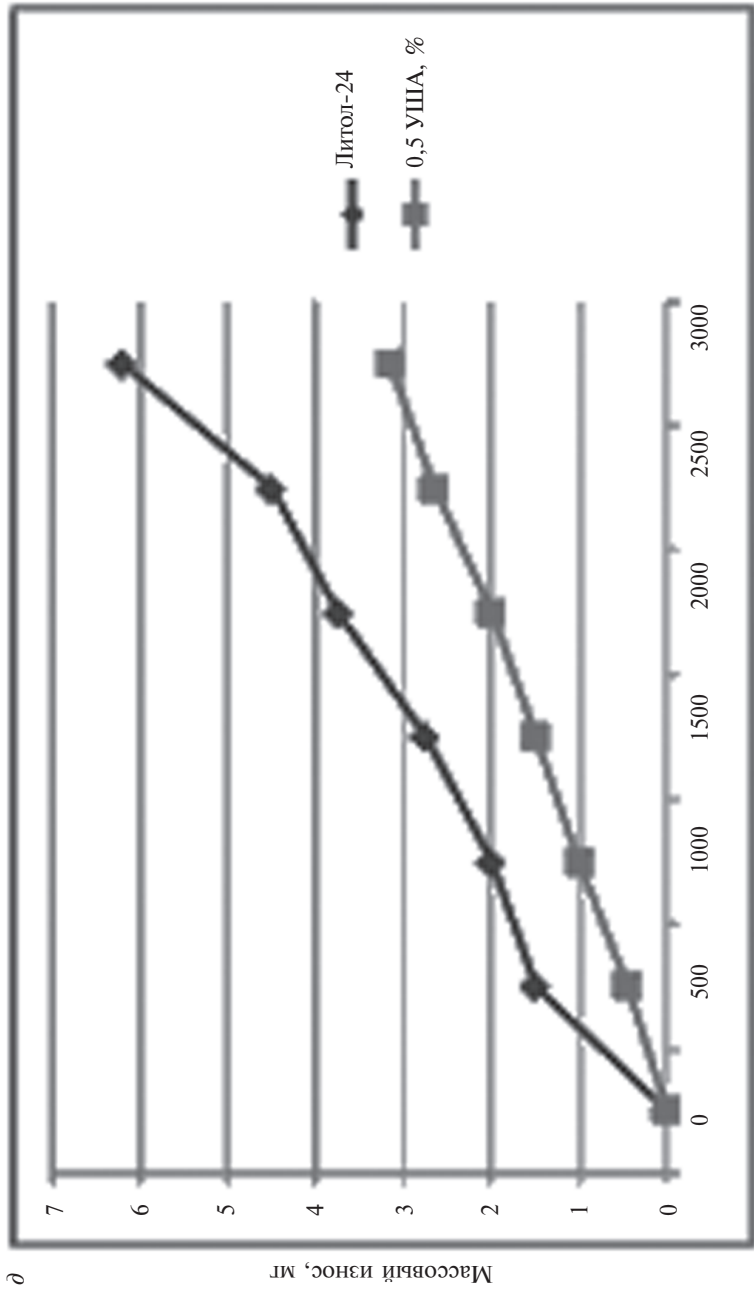


Путь трения, м  
Рисунок 1, в



Путь трения, м  
Рисунок 1,2

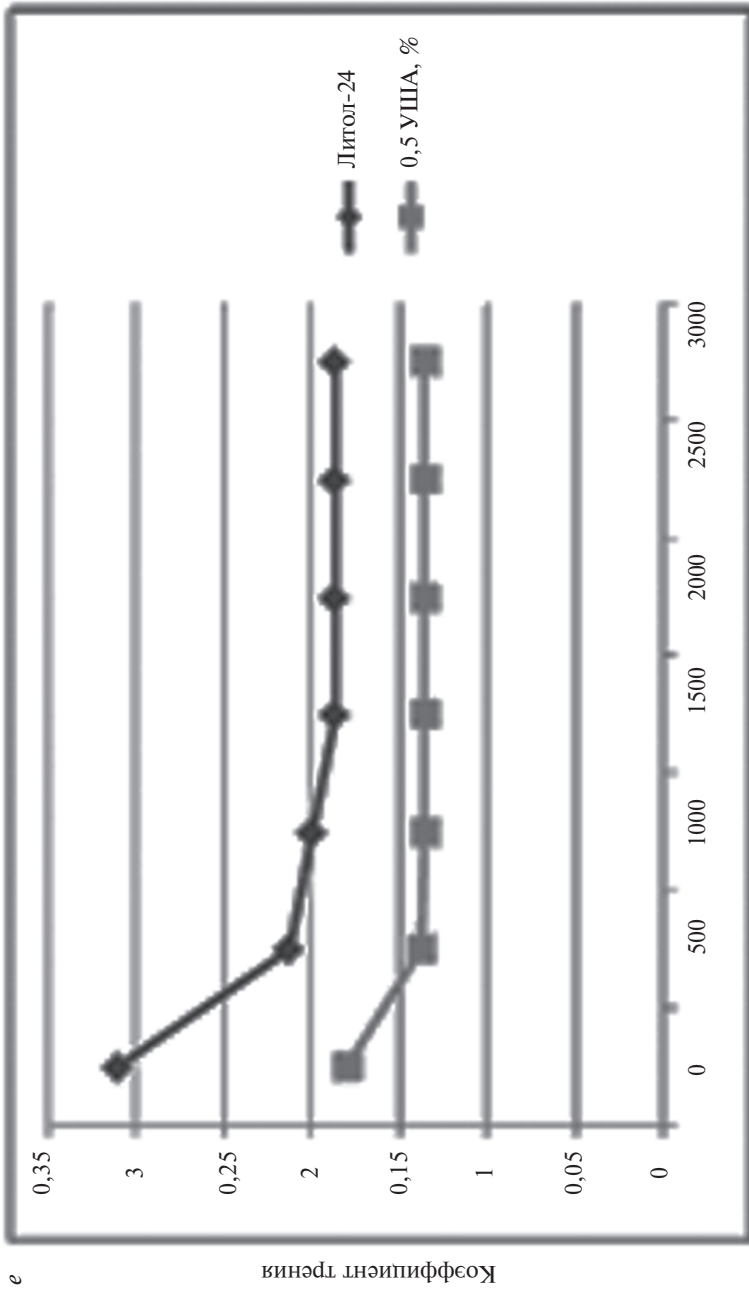




Путь трения, м  
Рисунок 1,δ

ρ

Массовый износ, мг



Путь трения, м

Рисунок 1,е

e

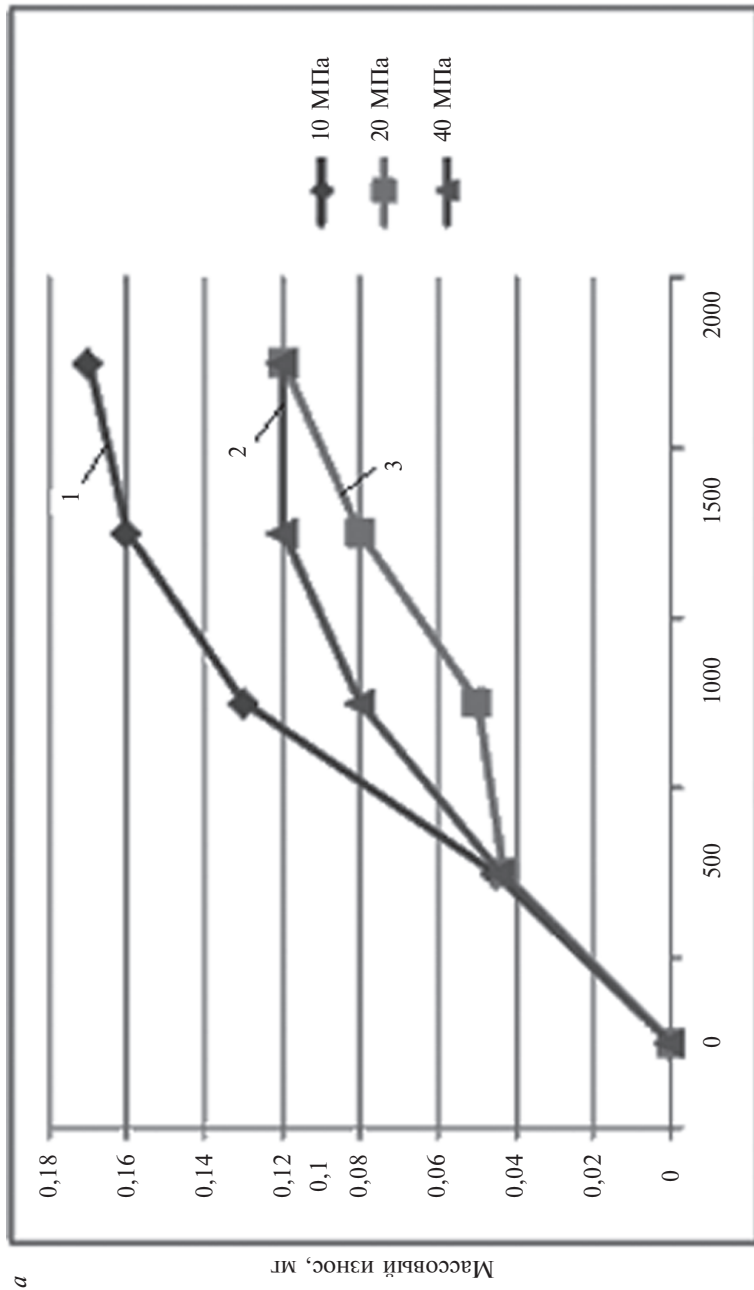
Коэффициент трения

значений коэффициента трения до 0,187 – 0,200 уже на самых ранних стадиях испытаний по сравнению со значениями при меньшем контактном давлении.

Исследования влияния контактного давления на режим приработки и триботехнические свойства фрикционной пары «бронза–сталь» при работе в среде смазки Литол-24, проведенные при номинальном контактном давлении, равном 10, 20 и 40 МПа, показали, что с повышением давления на поверхности контакта снижение коэффициента трения и интенсивности изнашивания при использовании комплексной литиевой смазки с УАШ наблюдается на более ранних стадиях приработки. Одной из возможных причин указанного эффекта является упрочнение поверхностных слоев бронзы за счет их модифицирования частицами ультрадисперсных алмазов в процессе фрикционного взаимодействия.

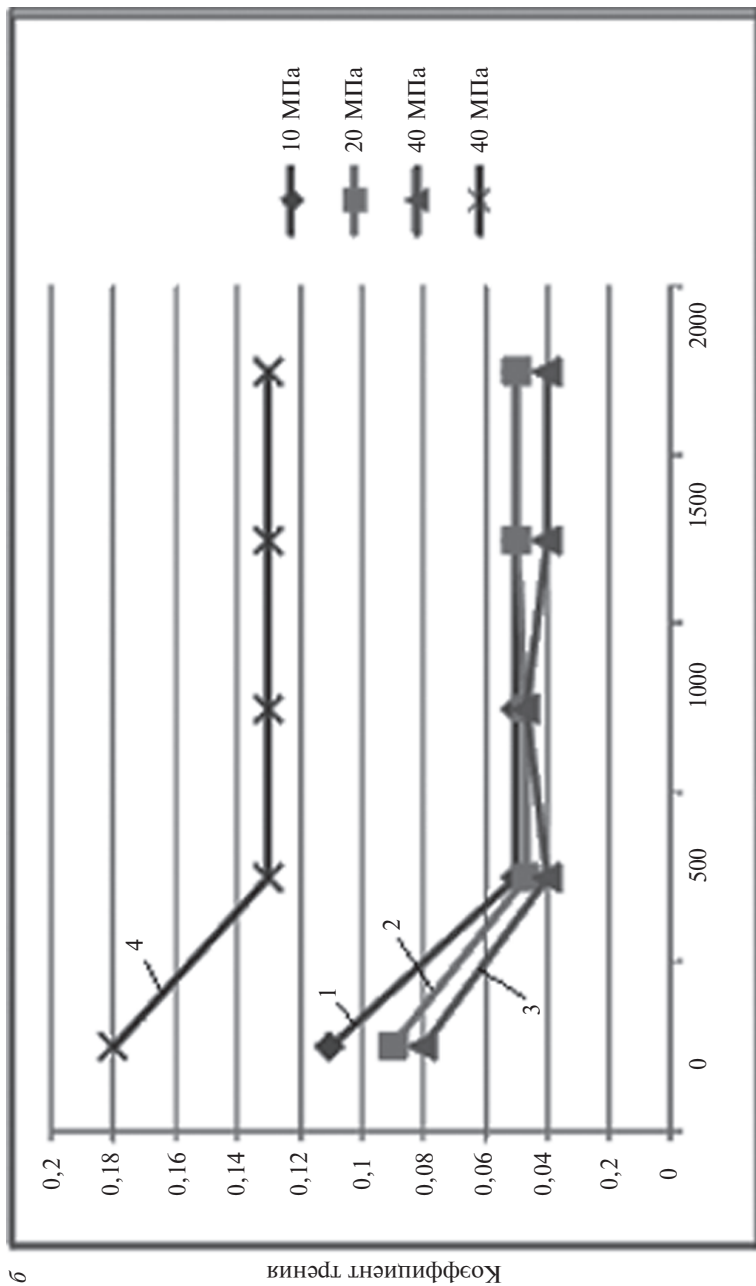
С целью проверки указанного предположения проведены дополнительные триботехнические испытания со смазкой Литол-24 образцов, прошедших предварительную приработку в среде модифицированной смазки. Результаты триботехнических испытаний свидетельствуют о сохранении высокой интенсивности изнашивания и низкого коэффициента трения у образцов, подвергнутых предварительной приработке в среде смазки, модифицированной УАШ (рисунок 2). Нароботка образцов с комплексной литиевой смазкой с УАШ превышает соответствующий показатель при работе со смазкой Литол-24 стандартного состава на 20 – 30 %.

В результате исследования влияния контактного давления на триботехнические свойства фрикционной пары установлено, что в условиях граничного трения пары «бронза – сталь» модифицирование смазочного материала добавками ультрадисперсной алмазографитовой шихты эффективно при давлениях свыше 20 МПа, что соответствует тяжело нагруженным узлам трения. При этом модифицированную смазку достаточно применять только на стадии приработки, поскольку использование после подобной приработки смазки Литол-24 обеспечивает низкий коэффициент трения ( $f = 0,04 – 0,05$ ) практически при отсутствии износа. Нароботка образцов с комплексной литиевой смазкой с УАШ превышает на 20 – 30 % соответствующий показатель при работе со смазкой Литол-24 стандартного состава.



Путь трения, м

1, 2, 3 – приработка в комплексной литевой смазке с УАШ, 4 – приработка в смазке Литол-24 стандартного состава  
 Рисунок 2,а – Зависимость массового износа (а) коэффициента трения (б) бронзы БрБ2 от пути трения после приработки при различном контактном давлении



Путь трения, м  
Рисунок 2,б

## Литература

1. Восстановление деталей машин: справочник / В.А. Горохов [и др.]. – М.: Наука и технология. – 2013. – 340 с.
2. Л.Б. Леонтьев, Системный анализ технологии формирования износостойких покрытий на поверхностях трения деталей / Л.Б. Леонтьев, А.Л. Леонтьев, В.Н. Макаров // Фундаментальные исследования. – 2014. – № 12 (часть 4). – С. 729 – 734.
3. Д.И. Кочанов, Наноматериалы и нанотехнологии для машиностроения: состояние и перспективы применения / Д.И. Кочанов // Журнал «РИТМ» № 8(56). – 2010, МИПК МГТУ им. Н.Э. Баумана. – 2010. – С. 16 – 21.