УДК 531.4:620.179.4

DOI: http://dx.doi.org/10.21780/2223-9731-2019-78-5-303-312

# О дегезионно-деформационной природе трения и изнашивания

## Д.П. МАРКОВ

Акционерное общество «Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта» (АО «ВНИИЖТ»), Москва, 129626, Россия

Аннотация. Сравниваются две теории трения: общепризнанная адгезионно-деформационная и альтернативная дегезионно-деформационная, основы которой заложены Прандтлем и Дерягиным. Уточнены понятия и особенности действия адгезионных и когезионных сил межатомного притяжения. Введено понятие и уточнены особенности действия дегезионных сил межатомного отталкивания. Дегезионно-деформационная теория получила развитие и сформулированы ее основные положения.

- При сближении двух атомов возникает адгезионное притяжение, переходящее затем в когезионную связь, а затем в дегезионное отталкивание (зависимость Леннарда-Джонса). Адгезионное притяжение возникает также между веществами, содержащими поляризованные молекулы (поверхностноактивные вещества).
- При сжатии твердых тел атомы одного тела вдавливаются в межатомные промежутки другого, образуя потенциальные барьеры — атомно-молекулярную шероховатость, создающую сопротивление тангенциальному смещению тел. При этом между атомами, как между одноименными полюсами магнита, возникают силы отталкивания, которые, достигнув точки неустойчивого равновесия (точки бифуркации), могут моментально смениться силами когезионного притяжения. При трении инверсия (смена) сил с образованием новых соединений наблюдается редко, поскольку давление бифуркации (разветвления процессов) у большинства пар веществ выше предела пластичности.
- Силы трения твердых тел возникают в результате зацепления неровностей атомно-молекулярной шероховатости на пятнах действительного контакта. Пропорциональность силы трения нормальному усилию (закон Кулона) обеспечивается, во-первых, пропорциональным увеличением высоты потенциальных барьеров атомарной шероховатости, во-вторых, увеличением площади пятен действительного контакта за счет пластической или упругой деформации.
- Реальное давление в условиях объемного сжатия в зонах действительного контакта твердых тел даже при сверхнизких нагрузках настолько высоко, что при сдвиге происходит не перескок частиц из одной потенциальной впадины в другую, а срез участков поверхности. Срезанные частицы износа ведут себя как твердые тела, прессуются в твердые конгломераты и царапают поверхности. Сила сухого трения определяется контактным давлением, прочностью конгломератов, являющихся фрагментами интерслоя, прочностью связей фрагментов интерслоя между собой и с поверхностями трения.
- При жидкостном трении молекулы движутся в безбарьерном, но неравномерном поле когезионных сил, что определяет отсутствие трения покоя и зависимость сил трения от скорости течения (закон Ньютона), в отличие от трения в газах,
- E-mail: dp-markov@yandex.ru (Д.П. Марков)

возникающего в результате столкновения свободно движущихся молекул (закон Максвелла).

• Жидкости, в составе которых нет поляризованных молекул, выдавливаются из зоны трения и не влияют на силу трения. Если смазочная жилкость солержит поверхностноактивные вещества, то сила трения может изменяться от максимальной твердотельной до минимальной жидкостной в зависимости от вязкости, содержания поверхностно-активных веществ, давления, площади контакта, скоростей скольжения и качения (зависимость Штрибека).

Ключевые слова: трение; атомарно-молекулярные механизмы трения; адгезия; когезия; дегезия; теории трения и изнашивания

**В**ведение. Пять веков человечество пытается ответить на вопрос «Что такое трение?». В 1929 г. Томлинсон констатировал [1]: «Общеизвестно, что трение является следствием сил, с которыми молекулы воздействуют друг на друга, когда находятся в тесной близости». Используя результаты первых исследований межатомного взаимодействия Леннарда-Джонса, Ричардса и др., он попытался подвести теоретическую базу под уже получившую популярность адгезионную теорию трения, переросшую впоследствии в официальную адгезионно-деформационную теорию трения и изнашивания (АДТ). Однако для объяснения феномена возникновения сил трения при относительном сдвиге твердых тел была предложена еще одна теория теория зацепления неровностей атомно-молекулярной шероховатости Прандтля-Дерягина, согласно которой атомы одной поверхности входят в межатомные промежутки другой, создавая потенциальные барьеры для касательных сил (подробнее см. [2]).

Теория трения должна объяснить не только сам феномен трения, но и другие процессы, сопутствующие внешнему трению, в том числе процесс изнашивания. Трение сопровождается диссипацией энергии и вещества, повреждением поверхностей твердых тел и другими явлениями, поэтому любая теория трения и изнашивания должна ответить также на фундаментальные вопросы трибологии.

- Каковы механизмы повреждения поверхностей твердых тел при трении (перенос, изнашивание)? Почему твердый металл переносится на мягкую бумагу?
- Каков механизм преобразования энергии трения в тепло?

• Как силы трения зависят от скорости? Почему трение скольжения твердых тел близко к трению покоя и в довольно широком диапазоне не зависит от скорости, а трение покоя в жидкостях равно нулю, появляется с началом движения и растет с увеличением скорости течения?

Кроме того, желательно, чтобы теория описывала возникновение сил жидкостного трения, которые в настоящее время объясняют, вызывающими много критики диффузионно-дырочным механизмом Френкеля и диффузионно-дислокационным механизмом Эйринга (см. [3]).

Все эти, а также множество других проблем решает представленная в статье дегезионно-деформационная теория трения и изнашивания (ДДТ). Проведем сравнительный анализ теорий АДТ и ДДТ.

- 1. Анализ адгезионно-деформационной теории трения и изнашивания. В основе АДТ лежат механизм зацепления и деформирования микровыступов Амонтона и атомарный механизм трения Томлинсона, с помощью которого Томлинсон попытался подвести теоретическую базу под гипотезу Дезагюлье и Харди адгезионного сцепления поверхностей [4—17]. Предполагают, что в зависимости от свойств поверхностей, окружающей среды и других условий может преобладать зацепление выступов или адгезия. Рассмотрим составляющие АДТ.
- 1.1. Механизм зацепления микровыступов. Механизм зацепления микровыступов сам по себе не объясняет, как энергия движения превращается в тепловую, то есть не является базовым механизмом трения: из проведенного Эйлером анализа следует, что для возникновения сил трения выступы должны царапать сопряженную поверхность, сами деформироваться пластически или на их склонах должна присутствовать шероховатость более высокого уровня [18]. Влияние (точнее, отсутствие влияния) на коэффициент

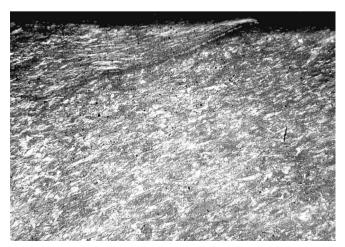


Рис. 1. Микроструктура деформированного поверхностного слоя вагонного колеса (×100)

Fig. 1. Microstructure of the deformed surface layer of a car wheel ( $\times 100$ )

трения шероховатости поверхностей технических пар трения наглядно демонстрируют два простых опыта.

- 1. Легко проверить, что коэффициент трения металлических брусков с одинаковой очисткой (или загрязненностью) поверхностей не зависит от величины и формы неровностей (например, строжка в различных направлениях, шлифовка, полировка и др.). Если очистка поверхностей проведена правильно, по одной методике, на поверхностях не осталось следов охлаждающих жидкостей, абразивов, полиролей и т. д., если все эксперименты проведены в одном помещении, при одной влажности и загрязненности воздуха или даже в вакууме, то различие в коэффициентах трения оказывается в пределах погрешности эксперимента.
- 2. Зеркальный клинок катаны после попадания в острие свинцовой пули остается неподвижным и чистым, но клинок, отполированный менее тщательно, после разреза пули вибрирует, а на лезвии можно обнаружить следы перенесенного свинца.

Эти опыты показывают, что выступы шероховатости могут влиять на трение и износ твердых тел только в том случае, если их крутизна и твердость достаточны для чисто механического зацепления и среза неровностей при данной скорости скольжения. Такой механизм трения является, по существу, механической абразивной обработкой микрорезанием. Соотношения твердостей и кругизны неровностей в технических парах трения обычно далеки от диапазона, в котором возникает резание. Например, песок под колесами локомотива моментально размалывается в дисперсную пудру и сдувается с рельсов, причем максимального значения коэффициент трения достигает не в момент действия абразива (0.4-0.5), а после его удаления, на чистых поверхностях (до 0,7). Шероховатость вагонных колес может варьировать от 1 мм после обточки до установившейся 0,1-1,0 мкм после пробега 1000-1500 км, и если бы неровности влияли на коэффициент трения, то такое изменение отразилось бы на сцеплении колес с рельсами. В эксплуатации, однако, не замечено изменения сцепления ни через десятки, ни через тысячи километров пробега. Небольшая скорость скольжения, небольшое отличие твердости колес и рельсов и малая крутизна неровностей исключают возможность их механического зацепления и срезания. Тем не менее силы трения при качении с проскальзыванием колес по рельсам достигают больших величин даже без применения песка.

На контактных поверхностях расплющиваются и вытягиваются в направлении действия касательных напряжений не только выступы шероховатости, но и участки поверхностного слоя на глубину до нескольких миллиметров (рис. 1). Это доказывает, что в контакте колесо—рельс действуют мощные

молекулярные силы, которые не связаны с зацеплением микровыступов. В настоящее время АДТ объясняет их адгезионным взаимодействием.

1.2. Гипотеза адгезионного сцепления. В настоящее время применяют два термина для обозначения сил межатомного притяжения — «адгезия» и «когезия». Считают, что адгезионные связи возникают между разнородными телами, а когезионные — внутри тел или между однородными телами, причем тип как тех, так и других связей может быть различным — от слабых ван-дер-ваальсовых или водородных до мощных металлических или ковалентных. Для межатомных сил отталкивания специального термина не предусмотрено. Адгезионно-деформационная теория трения исходит из того, что при сближении твердых тел на расстояния, сравнимые с межатомными, возникают мощные адгезионные связи. Предполагают, что, создавая касательные напряжения, достигающие предела прочности на срез, они бесследно исчезают при разгрузке. Неуловимость адгезионных связей между твердыми телами некоторые трибологи объясняют тем, что они якобы образуются при нагружении, но рвутся и бесследно исчезают после снятия нагрузки и упругого восстановления формы контакта (модели ДМТ и ДКР) [9, 12, 19, 20]. Однако о каком упругом восстановлении формы контакта может идти речь, если действительная контактная площадь даже зеркально отполированных поверхностей настолько мала [9, 19, 21], что пластические деформации в точках касания начинаются уже при нагрузке в несколько нанограммов? Пластическая деформация должна снять остаточные напряжения по крайней мере в точках действительного контакта, и хотя бы небольшая часть сил адгезионного сцепления должна после снятия нагрузки остаться и фиксироваться в экспериментах. Тем не менее они не регистрируются даже самыми точными инструментами в самых изощренных экспериментах и даже после макропластической деформации. Более того, в [22] показано, что срез и перенос материала при катастрофическом износе обусловлены не «слипанием» и вырывом свежих, «ювенильных» участков поверхности трения, как это трактует адгезионная теория [4, 9, 16, 19], а чисто механическим зацеплением клиньев задира.

Упрощенно отсутствие адгезионного сцепления в контакте большинства твердых тел можно объяснить тем, что все валентные связи соседних атомов на свободных поверхностях замкнуты сами на себя. Известно, что характер взаимодействия атомов, связанных в молекулы и в кристаллические структуры, отличается от взаимодействия свободных атомов [23-25]. Образование новых связей между структурами с уже сформированными связями может потребовать дополнительной энергии, то есть для их создания необходимо преодолеть силы отталкивания — дегезионные

силы. Между отдельными атомами при сближении возникают силы притяжения (адгезионные силы) и образуются химические связи. Однако для того чтобы химические (то есть когезионные) связи образовались между атомами, входящими в состав молекул, молекулам даже таких активных элементов, как водород и кислород, необходимо сообщить довольно большую дополнительную энергию, достаточную для преодоления сил отталкивания (дегезионных сил). В контакте большинства твердых тел, как между гигантскими газовыми молекулами, возникают преимущественно дегезионные силы отталкивания. Именно по этой причине, а не из-за малой площади контактирования осколки стекла невозможно соединить в одно целое даже в вакууме.

Причина того, что поведение атомов и молекул, находящихся в объеме тела, отличается от поведения атомов и молекул, находящихся на его поверхности, заключается не только в разном количестве «соседей», но и в различных типах межатомных связей. При сближении атомов валентные электроны стремятся объединиться таким образом, чтобы их магнитные и механические моменты были скомпенсированы и все орбиты были заполнены. Нескомпенсированные моменты и незаполненные орбиты проявляются как ненасыщенные связи (dangling bond). По Юм-Розери, ненасыщенные и насыщенные связи соответствуют размещению электронов на связующих и разрыхляющих орбитах [23]. Поверхности с насыщенными связями отталкиваются подобно тому, как отталкиваются одноименные полюса магнитов.

На воздухе активные связи мгновенно нейтрализуются молекулами адсорбированных атмосферных газов. На металлах экранирующий адсорбционный слой образуется чрезвычайно быстро. Азот, например, покрывает 99,9 % поверхности за  $10^{-8}$  с (10 наносекунд) [26]. Из-за экранирования поверхностей окисно-адсорбционными пленками и различными загрязнителями адгезионное соединение сталей даже с расплавленными металлами (пайка) осуществляется с трудом и только под слоем флюса.

Адгезионная теория не способна объяснить механизм адгезионного изнашивания материалов. Почему твердый металл переносится на мягкую бумагу? Рассмотрев различные варианты, Крагельский признал [5], что теория адгезионного взаимодействия не в состоянии описать все особенности изнашивания: «Если величина адгезионных сил достаточна, чтобы отделить часть материала одного тела и перенести на другое, то нет никаких причин для отрыва этого материала от второго тела. В конце концов вся поверхность второго тела должна покрыться пленкой материала первого тела, что равносильно трению однородных материалов. Если бы это было так, то износ не зависел бы от природы контртела и был бы

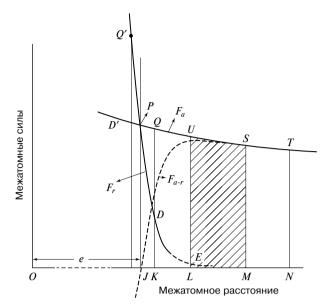
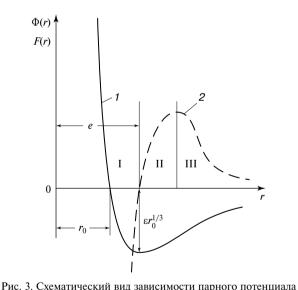


Рис. 2. Зависимость сил межатомного взаимодействия от межатомного расстояния по Томлинсону [1]: e — расстояние между атомами в отсутствие внешних сил ( $F_a = F_r$ );  $F_a$  — силы притяжения (attractions);  $F_r$  — силы отталкивания (repulsions);  $F_{a-r}$  — результирующая сил  $F_a$  и  $F_r$ 

Fig. 2. Dependence of the interatomic forces on the interatomic distance of Tomlinson [1]: e — distance between atoms without external forces ( $F_a = F_r$ );  $F_a$  — attraction forces;  $F_r$  — repulsion forces;  $F_{a-r}$  — result of forces  $F_a$  and  $F_r$ 



 $\Phi(r) = \varepsilon[(r_0/r)^{12} - 2(r_0/r)^6]$  (потенциал 12-6) [28] и силы F(r) межчастичного взаимодействия от расстояния между частицами: кривая I — потенциал  $\Phi(r)$ ; кривая 2 — сила F(r); I — дегезионный диапазон; II — когезионный диапазон; III — адгезионный диапазон;  $r_0$  — расстояние между частицами при нулевом потенциале взаимодействия;  $\varepsilon r_0^{1/3}$  — потенциал сцепления частиц; e — расстояние между атомами в отсутствие внешних сил Fig. 3. Schematic of the dependence of the pair potential  $\Phi(r) = \varepsilon[(r_0/r)^{12} - 2(r_0/r)^6]$  (potential 12-6) [28] and force F(r) of the interparticle interaction on the distance between particles: curve I — potential  $\Phi(r)$ ; curve 2 — force F(r); I — dehesion range; III — cohesion range; III — adhesion range;  $r_0$  — particle spacing at zero interaction potential;  $\varepsilon r_0^{1/3}$  — potential of particle bonding; e — distance between atoms without external forces

одним и тем же для всех контртел». Арчард [27] попытался вывести закон изнашивания, основанный на адгезионно-механическом зацеплении микровыступов, но расчетные коэффициенты износа оказались в тысячи раз меньше реальных, и это говорит о том, что трение основано на других механизмах.

1.3. Молекулярный механизм трения Томлинсона [1]. Томлинсон рассмотрел модель трения, состоящую, по существу, из двух атомов (третий атом добавлен, чтобы обозначить колебательную систему, в которой рассеивается энергия трения, но сами колебания при этом не рассматривал). На рис. 2 представлена зависимость сил, возникающих между атомами при их сближении, как ее представлял Томлинсон.

Трехатомная модель Томлинсонадалека от реальности не только потому, что не учитывает влияния соседних атомов, но и вследствие совершенно нереального диапазона сил притяжения. Характеристики межатомного взаимодействия постоянно уточняются. На рис. 3 представлена более реалистичная зависимость, получившая большое распространение в 1970-х гг.

Эту зависимость, обозначаемую как кривая Леннарда—Джонса [29] или парный потенциал межчастичного взаимодействия 12-6, используют и в современных методах молекулярной динамики для структур с ненаправленными связями [28, 30, 31], но и она не соответствует взаимодействию атомов при сближении твердых тел.

Введем определения для сил, возникающих при сближении атомов (см. рис. 3): адгезионные — возрастающие силы притяжения; когезионные — убывающие силы притяжения; дегезионные — возрастающие отталкивающие силы.

Реальные параметры межатомного взаимодействия между твердыми телами отличаются и от томлинсонского межатомного взаимодействия между твердыми телами и от потенциала 12-6 [28], поэтому, не вдаваясь в расчеты сил и коэффициентов трения скольжения и качения, которые Томлинсон сделал на основе ложного предположения о соответствии сил взаимодействия между телами силам парного межчастичного взаимодействия, проанализируем лишь его идеи.

- Томлинсон постулировал, что рассеяние энергии и, соответственно, возникновение сил трения при относительном смещении твердых тел возможны только при переходе через экстремум в точке L (заштрихованная площадь ULMS на рис. 2). Таким образом, при трении должны постоянно возникать и рваться адгезионно-когезионные связи (как заметил Крагельский, если образовалась мощная когезионная связь и произошел перенос материала, то нет никаких причин для ее разрыва и обратного переноса).
- В когезионное взаимодействие вступает лишь малая доля атомов «атомы непосредственного контакта». Часть из них при дальнейшем сближении

попадает в диапазон действия сил отталкивания и воспринимает всю внешнюю нагрузку. Остальные оказываются в зоне когезионно-адгезионного притяжения

Эти постулаты привели к странным выводам и результатам:

- силы трения возникают при адгезионно-когезионном сцеплении-расцеплении атомов, но их величина определяется силами отталкивания;
- энергия и силы, возникающие при расцеплении атомов (у Томлинсона это силы трения), не зависят от давления;
- закон Кулона объясняется исключительно увеличением числа атомов непосредственного контакта, то есть увеличением действительной площади контакта при повышении нагрузки.

Томлинсон высказал еще одно замечательное предположение, значимость которого он не оценил: работа трения может совершаться когезионными силами притяжения (диапазон J—L на рис. 2 или диапазон II на рис. 3) без перехода через максимум и разрыва адгезионных связей. Движение частиц в поле когезионных сил (что соответствует плавному перемещению атомов без перескоков через потенциальные барьеры в теории Прандтля [2, 32]) должно сопровождаться рассеянием энергии и возникновением силы трения, зависимой от скорости, вследствие изменения частоты и, соответственно, энергии колебательных процессов, возникающих при движении частиц в неоднородном силовом поле.

Последнее предположение фактически подводит к объяснению механизма жидкостного трения: именно перемещение частиц жидкости в полях безбарьерных когезионных сил не позволяет им свободно разлетаться, как молекулам газа, и определяет скоростную зависимость трения (закон Ньютона). Отсутствие скоростной зависимости сухого трения (возникающего, по Томлинсону, в полях адгезионно-когезионных сил) Томлинсон неубедительно объяснил особенностями теплового движения атомов. Ограничившись рассмотрением только трения твердых тел, Томлинсон, как и Прандтль (см. [2]), прошел мимо феномена жидкостного трения.

Модель Томлинсона неадекватна, поскольку основана на нереальной зависимости межатомного взаимодействия и неверных предпосылках, но его теория содержит рациональное зерно, позволяющее с учетом идей Прандтля и Дерягина (см. [2]) вплотную подойти к пониманию механизмов не только внешнего трения, но и трения в твердых телах, жидкостях и газах. Из их идей следует:

• при трении твердых тел частицы (атомы или молекулы) преодолевают потенциальные барьеры в дегезионно-когезионной зоне. Величина барьеров зависит от давления и не зависит от скорости, и поэтому при сухом трении твердых тел силы трения скольжения почти равны силам трения покоя и не зависят от скорости (закон Кулона);

- при жидкостном трении молекулы перемещаются в безбарьерном, но неравномерном поле когезионных сил притяжения. Поскольку нет барьеров, то трение покоя равно нулю. При движении частиц (атомов или молекул) в неоднородном силовом поле они совершают колебания, частота и энергия которых пропорциональны скорости (закон Ньютона);
- при трении в идеальном газе связи между молекулами не возникают и энергия от молекулы к молекуле передается только при столкновениях (закон Максвелла).
- 2. Дегезионно-деформационная теория трения и изнашивания. Проведенный выше анализ показывает, что можно в принципе создать непротиворечивую теорию трения, основанную на гипотезе не адгезионного притяжения, а дегезионного отталкивания — дегезионно-деформационную теорию (ДДТ), основные положения которой следующие.
- 1. Размер и форма выступов шероховатости на поверхностях технических пар трения не влияют на силу трения.
- 2. При сближении двух атомов возникают адгезионно-когезионные связи, приводящие к образованию молекул. При сближении атома с твердым телом адгезионно-когезионная связь возникает только при его попадании в определенное место (точку роста кристалла). При попадании атома в другие места действуют дегезионные силы отталкивания. Это обусловливает строение кристаллов, их рост по кристаллографическим плоскостям и объясняет отталкивание твердых тел при их сближении. Достигнув точки неустойчивого равновесия, отталкивание моментально сменяется когезионным притяжением. Так, например, под высоким давлением из мраморной крошки образуется единый монолит. При трении инверсия (смена) сил с образованием новых структур наблюдается редко, поскольку давление бифуркации у большинства пар веществ выше предела пластичности.
- 3. Законы сухого трения, в частности закон Кулона, определяются преодолением атомами и/или молекулами потенциальных барьеров в дегезионнокогезионной зоне. Высота барьеров определяется величиной сил когезии и внешних сил.
- 4. Законы жидкостного трения, например закон Ньютона, определяются перемещением атомов и/или молекул в неравномерном безбарьерном поле когезионных сил.
- 5. Адгезионные силы между телами, достаточные для того, чтобы их можно было заметить, возникают лишь при сцеплении с поляризованными молекулами жидкостей, обладающими поверхностной

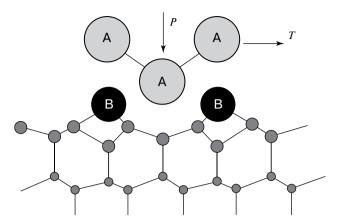


Рис. 4. Схема возникновения сил трения при попадании выступающих атомов A одной поверхности в промежутки между атомами B—B на другой поверхности в атомно-молекулярных структурах: P — нормальная сила; T — касательная внешняя сила

Fig. 4. Scheme of friction forces onset in the case of entering of protruded atoms (A) of one surface into the gaps between atoms (B-B) on the other surface in the atomic-molecular structures:
P - normal force; T - tangential external force

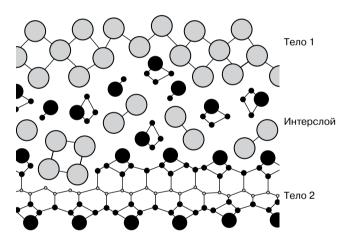


Рис. 5. Упрощенная схема образования интерслоя пары трения в результате зацепления, среза и перемешивания фрагментов атомно-молекулярных структур в условиях всестороннего сжатия (молекулы внешней среды не показаны)

Fig. 5. Simplified scheme of the formation of interlayers of friction pairs as a result of engagement, cut-off, and mixing of fragments of the atomic-molecular structures in the conditions of uniform pressure (molecules of the external environment are not shown)

активностью. Эти силы настолько малы, что снижают коэффициент трения до 0,1-0,001, но достаточны для предотвращения выдавливания жидкостей из зоны контакта (жидкости, не содержащие поляризованных молекул, не смачивают поверхности, выдавливаются из зоны контакта и не оказывают смазочного действия).

6. При трении в идеальном газе связи между молекулами не возникают и энергия от молекулы к молекуле передается только дегезионными силами при столкновениях (закон Максвелла).

Большинство методик расчета сдвиговой прочности твердых тел, начиная с методики Френкеля и заканчивая теорией дислокаций, основано на предположении о том, что при сдвиге атомы перескакивают из одного устойчивого положения в другое, преодолевая потенциальные барьеры. Прандтль предположил, что этот принцип применим как при деформировании твердых тел, так и при внешнем трении [32]. Дерягин положил его в основу теории зацепления выступов и впадин естественной атомно-молекулярной шероховатости [33, 34]. Идеи Прандтля и Дерягина не получили распространения из-за недостатка сведений об особенностях атомно-молекулярных связей при контактном взаимодействии твердых тел, а без этого, как известно, невозможно понять механизмы изнашивания. Считалось, что при контакте атомов одной структуры с атомами другой неизбежно возникают когезионные связи, что делало механизм изнашивания при дегезионном взаимодействии еще более нереальным, чем при адгезионном, а предполагать, что между структурами действуют силы отталкивания, не было никаких оснований.

На рис. 4 представлена схема, поясняющая возникновение сил трения при зацеплении атомно-молекулярных неровностей двух различных структур. В теориях Прандтля и Дерягина допускается сдвиг по разделу тел (безызносное трение), но, в отличие от адгезионной теории, не за счет разрыва адгезионных связей, а вследствие преодоления потенциальных барьеров при перескоке атомов из одной впадины в другую. Однако реальные давления в зонах действительного контакта твердых тел даже при сверхнизких нагрузках настолько высоки, что при сдвиге происходит не перескок частиц из одной впадины в другую, а срез выступающих частиц (например, атома А, см. рис. 4), что объясняет перенос частиц твердого металла на мягкую бумагу при трении. При давлениях, характерных для технических пар трения, деформируются и срезаются уже не отдельные выступы, а макрофрагменты поверхностного слоя. В процессе среза когезионные связи фрагментов с поверхностями рвутся и заменяются дегезионными, чему способствует адсорбирование на их поверхностях атмосферных газов и паров. Из этих фрагментов формируется динамически изменяющийся интерслой пары трения, условно показанный на рис. 5.

Частички износа в интерслое могут механически спрессовываться в конгломераты от молекулярных до макроразмеров. В условиях всестороннего сжатия интерслой сохраняет прочность на срез почти на уровне твердого тела, но распадается на отдельные частички или их конгломераты сразу после выброса из зоны трения в виде продуктов износа. Размер конгломератов зависит от свойств материалов пары трения, среды и давления. Прочность конгломератов

на сдвиг в условиях всестороннего сжатия может превосходить прочность тел, и тогда они режут поверхности трения, оставляя царапины, соответствующие их размерам. Если обе поверхности близки по твердости, склонны к наклепу, например сталь-сталь, а давление превосходит порог задира, то срезаемые фрагменты вдавливаются в обе поверхности и, играя роль «затравки», инициируют образование клиньев задира. Клинья задира, цепляясь друг за друга, пропахивают поочередно обе поверхности, сгребая перед собой материал, увеличиваются в размерах и оставляют на поверхностях расширяющиеся борозды. При выходе борозды из зоны трения один из клиньев срезается, оставаясь обычно механически сцепленным с контрклином до следующего цикла. В продуктах изнашивания при этом появляется «металлическая стружка». Задир боковых поверхностей является одной из причин резкого снижения срока службы колес и рельсов (о задире и других видах катастрофического износа см. [22]).

Если интерслой состоит из фрагментов веществ с различной прочностью связей, то величина коэффициента трения определяется соотношением количества этих веществ. В присутствии веществ с сильными адгезионными связями (поверхностноактивные вещества (ПАВ), жидкости с выраженными поляризационными свойствами) сдвиг смещается в когезионный диапазон и коэффициент трения начинает снижаться. Когда количество такой жидкости становится достаточным для полного смачивания поверхностей всех фрагментов интерслоя (например, частиц глины, песка), трение становится полностью жидкостным и коэффициент трения резко падает почти до уровня коэффициента трения жидкости.

Дегезионно-деформационный механизм трения объясняет все особенности трения и изнашивания, включая катастрофические. В отличие от адгезионного механизма, он предполагает неразрывную связь трения и износа: не существует трения без износа и износа без трения (не может быть «упругого» взаимодействия, приводящего к отсрочке разрушения, как в теории усталостного износа Крагельского). Дегезионно-деформационный механизм трения-изнашивания не нуждается в присутствии адгезионных сил. Более того, в условиях действия только дегезионных сил отталкивания основной закон внешнего трения — закон Кулона соблюдается на атомно-молекулярном уровне даже при постоянной действительной площади контакта. Атомномолекулярная шероховатость является базовым параметром атомно-молекулярной структуры твердых тел, что объясняет высокую стабильность коэффициентов трения. Процесс трения-изнашивания, начиная с первого соприкосновения поверхностей и заканчивая выбросом спрессованных продуктов

изнашивания из зоны трения, протекает исключительно в зоне сжатия и невозможен без действия дегезионных сил отталкивания и деформирования фрагментов поверхностного слоя твердых тел. Именно поэтому название «дегезионно-деформационная теория» наиболее точно соответствует ее сущности. ДДТ позволяет предсказывать параметры трения, типы износа, объяснить перенос атомов твердых металлов на мягкую бумагу, механизмы и причины возникновения катастрофических типов износа, зависимость трения и износа от количества и свойств жидкой составляющей интерслоя, силовых и скоростных характеристик трибоконтакта (зависимости Штрибека). Силы трения определяются прочностью фрагментов интерслоя и прочностными характеристиками их сцепления с поверхностями трения и между собой, что дает возможность проектировать и создавать на научной основе фрикционные и антифрикционные материалы для пар трения с заданными свойствами.

Заключение. Предложена ДДТ трения и изнашивания, основные положения которой следующие.

- 1. Силы трения, действующие на атомарно-молекулярном уровне, подразделяют на адгезионные силы притяжения, возрастающие при сближении атомов; когезионные — силы притяжения, убывающие при сближении атомов; и дегезионные отталкивающие силы, возрастающие при сближении атомов.
- 2. При сближении двух атомов возникает адгезионное притяжение, переходящее затем в когезионную связь, а затем в дегезионное отталкивание (зависимость Леннарда-Джонса). Адгезионное притяжение возникает также между веществами, содержащими поляризованные молекулы (ПАВ).
- 3. При сжатии твердых тел атомы одного тела вдавливаются в межатомные промежутки другого, образуя потенциальные барьеры — атомно-молекулярную шероховатость, создающую сопротивление тангенциальному смещению тел. При этом между атомами, как между одноименными полюсами магнитов, возникают силы отталкивания, которые, достигнув точки неустойчивого равновесия (точки бифуркации), могут моментально смениться силами когезионного притяжения. При трении инверсия (смена) сил с образованием новых соединений наблюдается редко, поскольку давление бифуркации (разветвления процессов) у большинства пар веществ выше предела пластичности.
- 4. Силы трения твердых тел возникают в результате зацепления неровностей атомно-молекулярной шероховатости на пятнах действительного контакта. Пропорциональность силы трения нормальному усилию (закон Кулона) обеспечивается, во-первых, пропорциональным увеличением высоты потенциальных

барьеров атомарной шероховатости, во-вторых, увеличением площади пятен действительного контакта за счет пластической или упругой деформации (в зависимости от соотношения пластических и упругих свойств тел).

- 5. Реальные давления в условиях объемного сжатия в зонах действительного контакта твердых тел даже при сверхнизких нагрузках настолько высоки, что при сдвиге происходит не перескок частиц из одной потенциальной впадины в другую, а срез участков поверхности. Срезанные частицы износа ведут себя как твердые тела, прессуются в твердые конгломераты и царапают поверхности. Сила сухого трения определяется контактным давлением, прочностью конгломератов, являющихся фрагментами интерслоя, прочностью связей фрагментов интерслоя между собой и с поверхностями трения.
- 6. При жидкостном трении молекулы движутся в безбарьерном, но неравномерном поле когезионных сил, что определяет отсутствие трения покоя и зависимость сил трения от скорости течения (закон Ньютона), в отличие от трения в газах, возникающего в результате столкновения свободно движущихся молекул (закон Максвелла).
- 7. Жидкости, в составе которых нет поляризованных молекул, выдавливаются из зоны трения и не влияют на силу трения. Если смазочная жидкость содержит ПАВ, то сила трения может изменяться от максимальной твердотельной до минимальной жидкостной в зависимости от вязкости, содержания ПАВ, давления, площади контакта, скоростей скольжения и качения (зависимость Штрибека).

# СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Tomlinson G.A. A molecular theory of friction // Philosophical magazine and journal of science. 1929. Vol. 7. No. 46. P. 905–939.
- 2. Марков Д.П. Развитие представлений о механизмах трения // Трение и износ. 2013. Т. 34. № 1. С. 87–101.
- 3. Марков Д.П. Развитие представлений о механизмах трения в жидкостях // Трение и износ. 2015. Т. 36. № 5. С. 569–576.
- 4. Боуден Ф. П., Тейбор Д. Трение и смазка твердых тел. Ч. 2 М.: Машиностроение, 1968. 544 с.
- 5. Крагельский И.В. Трение и износ. М.: Машиностроение, 1968—480 с
- 6. Буше Н. А. Трение, износ и усталость в машинах. М.: Транспорт, 1987. 223 с.
- 7. Справочник по триботехнике / под ред. М. Хебда, А. В. Чичинадзе. Т. 1. Теоретические основы. М.: Машиностроение, 1989. 400 с.
- 8. Трибология. Исследования и приложения: опыт США и стран СНГ. М.: Машиностроение, 1993. 452 с.
- 9. Williams J.A. Engineering tribology. Oxford, N.Y., Tokyo: Oxford University press, 1994. 488 p.
- 10. Основы трибологии (трение, износ, смазка): учебник для техн. вузов / под ред. А. В. Чичинадзе. М.: Центр «Наука и техника», 1995. 778 с.
- 11. Основы трибологии (трение, износ, смазка): учебник для техн. вузов. / под общ. ред. А.В. Чичинадзе. 2-е изд. М.: Машиностроение, 2001. 664 с.

- 12. Горячева И.Г. Механика фрикционного взаимодействия. М.: Наука, 2001. 478 с.
- 13. Пенкин Н.С., Сербин В.М. Основы трибологии и триботехники: учеб. пособие. М.: Машиностроение, 2008. 206 с.
- 14. Фролов К. В. Современная трибология: итоги и перспективы. М.: ЛКИ. 2008. 480 с.
- 15. Полюшкин Н. Г. Основы теории трения, износа и смазки: учеб. пособие. Красноярск: Краснояр. гос. аграр. ун-т, 2013. 192 с.
- 16. Лужнов Ю. М., Александров В.Д. Основы триботехники: учеб. пособие / под ред. Ю. М. Лужнова. М.: МАДИ, 2013.
- 17. Теория трения и изнашивания: учебно-методический комплекс / сост. А.В. Михайлов, И.А. Королев, В.А. Красный. СПб.: Санкт-Петербургский горный университет, 2016. 166 с.
  - 18. Dowson D. History of tribology. London-NY, 2001. 806 p.
- 19. Мышкин Н.К., Петраковец М.И. Трибология. Принципы и приложения. Гомель: ИММС НАНБ, 2002. 304 с.
- 20. Михин Н. М. Внешнее трение твердых тел. М.: Наука, 1977. 221 с.
- 21. Persson B. N. Sliding friction: physical principals and applications. Springer, 1998. 462 p.
- 22. Марков Д.П. Трибология и ее применение на железнодорожном транспорте / Труды ВНИИЖТ. М.: Интекст, 2007. 405 с.
- 23. Юм-Розери В. Атомная теория для металлургов. М.: Металлургиздат, 1955. 232 с.
- 24. Алехин В. П. Физика прочности и пластичности поверхностных слоев материалов. М.: Наука, 1983. 280 с.
- 25. Аникина В. И. Основы кристаллографии и дефекты кристаллического строения: курс лекций. Красноярск: Сибирский федеральный университет, 2007. 238 с.
- 26. Лудема С. К. Основы теории трения и изнашивания // Трибология. Исследования и приложения: опыт США и стран СНГ. М.: Машиностроение, 1993. С. 19—29.
- 27. Archard J. F. Contact and rubbing of flat surfaces // Journal of Applied Physics. 1953. No. 24. P. 981–988.
- 28. Стишов С. М. Термодинамика плавления простых веществ // Успехи физических наук. 1974. Т. 114. № 10. С. 3—40.
- 29. Lennard-Jones J. E., Devonshire A. F. Critical and co-operative phenomena. III. A theory of melting and the structure of liquids. Proc. R. Soc. Lond. A, 1939. 169 p.
- 30. Whalley E., Schneider W.G. The Lennard-Jones 12:6 potential and the viscosity of gases // J. Chem. Phys. 1952. No. 20. P. 657. DOI: https://doi.org/10.1063/1.1700510.
- 31. Википедия. Потенциал Леннарда—Джонса [Электронный ресурс]. URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9F%D0%BE%D1%82%D0%B5%D0%BD%D1%86%D0%B8%D0%B0%D0%BB\_%D0%9B%D0%B5%D0%BD%D0%BD%D0%B0%D1%80%D0%B4-%D0%94%D0%B6%D0%BE%D0%BD%D1%81%D0%B0 (дата обращения: 22.07.2019 г.).
- 32. Popov V.L., Gray J.A.T. Prandtl-Tomlinson model: History and applications in friction, plasticity, and nanotechnologies // ZAMM·Z. Angew. Math. Mech. 2012. Vol. 92. No. 9. P. 683–708. DOI: https://doi.org/10.1002/zamm.201200097.
- 33. Дерягин Б. В. Молекулярная теория трения и скольжения // Журнал физической химии. 1934. Т. 5. № 9. С. 1165–1176.
  - 34. Дерягин Б. В. Что такое трение? М.: АН СССР, 1963. 230 с.

## **ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ**

#### МАРКОВ Дмитрий Петрович,

д-р техн. наук, главный научный сотрудник, АО «ВНИИЖТ»

Статья поступила в редакцию 03.06.2019 г., принята к публикации 28.08.2019 г.

## Dehesion-deformational nature of friction and wear-out

#### D.P. MARKOV

Joint Stock Company "Railway Research Institute" (JSC "VNIIZhT"), Moscow, 129626, Russia

Abstract. Two friction theories are compared: generally recognized adhesion deformation theory and alternative dehision deformation theory, founded by Prandtl and Deryagin. Concepts and peculiarities of effect of adhesion and cohesion forces of interatomic attraction are clarified. The concept of dehesion forces of interatomic repulsion is instroduced; their features are specified. Dehision deformation theory basic provisions are as follows:

- Compression of solid bodies results in occurrence of the interatomic repulsion forces, which after reaching the unstable equilibrium point (bifurcation point) can be instantaneously replaced with the cohesion attraction forces. Inversion (replacement) of forces forming new compounds are rare during friction, as bifurcation pressure (processes splitting) in the most pairs of substance is higher than the plasticity limit.
- · Friction forces of solid bodies result from engagement of irregularities of the atomic-molecular roughness at the spots of actual contact. The proportionality of friction force to the normal force (Coulomb's law) is ensured by increase of the depth of engagement of the atomic roughness, and by increase of the area of spots of actual contact.
- Displacement results in the cut-out of the contact surface areas. The cut-out particles of wear and tear act as the solid bodies; the particles are pressed in solid conglomerates and scratch the surfaces. Dry friction force is determined by the contact pressure, by the interlayer fragments strength, and by the strength of their links between each other and with the friction surfaces.
- · In case of liquid friction, molecules are moved in a barrierfree irregular field of cohesion forces, thereby determining absence of friction of rest and dependence of friction forces on the flow velocity (Newton's law), in contrast to gas friction resulting from collision of the freely moving molecules (Maxwell's law).
- · Liquids, which do not include polarized molecules, are pressed out of the friction area and do not affect the friction force. If lubricant includes SAS, then the friction force can change from maximum solid to minimum liquid depending on viscosity, SAS content, pressure, contact area, and slide-to-roll ratio (Stribeck dependence).

Keywords: friction; atomic-molecular friction mechanism; adhesion; cohesion; dehesion; friction and wear-out theory

**DOI:** http://dx.doi.org/10.21780/2223-9731-2019-78-5-303-312

#### **REFERENCES**

- 1. Tomlinson G.A. A molecular theory of friction. Philosophical magazine and journal of science, 1929, Vol. 7, no. 46, pp. 905-939.
- 2. Markov D.P. Razvitiye predstavleniy o mekhanizmakh treniya [Development of ideas on friction mechanisms]. Treniye i iznos, 2013, Vol. 34, no. 1, pp. 70-82.
- 3. Markov D.P. Razvitiye predstavleniy o mekhanizmakh treniya v zhidkostyakh [Evolution of views on mechanisms of friction in liquids]. Treniye i iznos, 2015, Vol. 36, no. 5, pp. 569-576.
- 4. Bowden F. P., Tabor D. Treniye i smazka tverdykh tel [The friction and lubrication of solids]. P. 2. Oxford, 1964 (in Eng.).
- 5. Kragel'skiy I.V. Treniye i iznos [Friction and wear-out]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1968, 480 p.
- 6. Bushe N.A. Treniye, iznos i ustalost' v mashinakh [Friction, wear-out and fatigue in machines]. Moscow, Transport Publ., 1987, 223 p.
- 7. Spravochnik po tribotekhnike [Reference guide for triboengineering]. Vol. 1. Theoretical fundamentals. Ed. by M. Khebda, A.V. Chichinadze. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1989, 400 p.

- 8. Tribology in the USA and the Former Soviet Union: Studies and Applications. N.Y., Allerton Press, 1994, 453 p. (in Eng.).
- 9. Williams J.A. Engineering tribology. Oxford, N.Y., Tokyo, Oxford University press, 1994. 488 p.
- 10. Osnovy tribologii (treniye, iznos, smazka). Uchebnik dlya tekhn. vuzov [Fundamentals of tribology (friction, wear-out, lubrication). Textbook for technical universities]. Ed. by A.V. Chichinadze. Moscow, Science and engineering, 1995, 778 p.
- 11. Osnovy tribologii (treniye, iznos, smazka). Uchebnik dlya tekhn. vuzov [Fundamentals of tribology (friction, wear-out, lubrication). Textbook for technical universities]. Ed. by A.V. Chichinadze. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2001, 664 p.
- 12. Goryacheva I.G. Mekhanika friktsionnogo vzaimodeystviya [Mechaniscs of friction interaction]. Moscow, Nauka Publ., 2001, 478 p.
- 13. Penkin N.S., Serbin V.M. Osnovy tribologii i tribotekhniki. Ucheb. posobiye [Fundamentals of tribology and triboengineering. Textbook]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2008, 206 p.
- 14. Frolov K.V. Sovremennaya tribologiya: itogi i perspektivy [Modern tribology: results and prospects]. Moscow, LKI, 2008, 480 p.
- 15. Polyushkin N.G. Osnovy teorii treniya, iznosa i smazki. Ucheb. posobiye [Fundamentals of the theory of friction, wear-out and lubrication. Textbook]. Krasnoyarsk, Krasnoyarsk State Agrarian University, 2013, 192 p.
- 16. Luzhnov Yu.M., Aleksandrov V.D. Osnovy tribotekhniki. Ucheb. posobiye [Fundamentals of triboengineering. Textbook]. Moscow, MADI, 2013, 136 p.
- 17. Teoriya treniya i iznashivaniya. Uchebno-metodicheskiy kompleks [Theory of friction and wera-out. Teaching package]. Ed. by A.V. Mikhailov, I.A. Korolev, V.A. Krasny. Saint Petersburg, Saint Petersburg Mining University, 2016, 166 p.
  - 18. Dowson D. History of tribology. London-NY, 2001, 806 p.
- 19. Myshkin N.K., Petrakovets M.I. Tribologiya. Printsipy i prilozheniya [Tribology. Principles and applications]. Gomel', IMS NANB, 2002, 304 p.
- 20. Mikhin N.M. Vneshneye treniye tverdykh tel [External friction of solids]. Moscow, Nauka Publ., 1977, 221 p.
- 21. Persson B. N. Sliding friction: physical principals and applications. Springer, 1998, 462 p.
- 22. Markov D.P. Tribologiya i eye primeneniye na zheleznodorozhnom transporte [Tribology and its application at the railway transport]. Trudy VNIIZhT [Proc. of the VNIIZhT]. Moscow, Intext Publ., 2007, 405 p.
- 23. Hume-Rothery W. Atomnaya teoriya dlya metallurgov [The atomic theory for metallurgists]. Oxford, 1952 (in Eng.).
- 24. Alekhin V.P. Fizika prochnosti i plastichnosti poverkhnostnykh sloyev materialov [Physics of strength and plasticity of the material surface layers]. Moscow, Nauka Publ., 1983, 280 p.
- 25. Anikina V.I. Osnovy kristallografii i defekty kristallicheskogo stroyeniya [Fundamentals of crystallography and defects of crystalline structures. Lectures]. Krasnoyarsk, Siberian Federal University, 2007, 238 p.
- 26. Ludema S.K. Osnovy teorii treniya i iznashivaniya [Fundamentals of the theory of friction and wear-out]. Tribology in the USA and the Former Soviet Union: Studies and Applications. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1993, pp. 19-29.
- 27. Archard J. F. Contact and rubbing of flat surfaces. Journal of applied physics, 1953, no. 24, pp. 981-988.
- 28. Stishov S. M. Termodinamika plavleniya prostykh veshchestv [Thermodynamics of the elements melting]. Uspekhi fizicheskikh nauk, 1974, Vol. 114, no. 10, pp. 3-40.

- 29. Lennard-Jones J. E., Devonshire A. F. *Critical and co-operative phenomena*. III. A theory of melting and the structure of liquids. Proc. R. Soc. Lond. A, 1939, 169 p.
- 30. Whalley E., Schneider W. G. The Lennard-Jones 12:6 potential and the viscosity of gases. J. Chem. Phys, 1952, no. 20, p. 657. DOI: https://doi.org/10.1063/1.1700510.
- 31. Vikipediya. *Potentsial Lennard-Dzhonsa* [Lennard-Jones potential]. URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9F%D0%BE%D1%82%D0%B5%D0%BD%D1%86%D0%B8%D0%B0%D0%B0%D0%B0%D0%B0%D0%B0%D1%80%D0%B4-%D0%94%D0%B6%D0%BE%D0%BD%D1%81%D0%B0 (retrieved on 22.07.2019).
- 32. Popov V.L., Gray J.A. Prandtl-Tomlinson model: history and applications in friction, plasticity, and nanotechnologies.
- E-mail: dp-markov@yandex.ru (D.P. Markov)

ZAMM·Z. Angew. Math. Mech, 2012, Vol. 92, no. 9, pp. 683–708. DOI: https://doi.org/10.1002/zamm.201200097.

- 33. Deryagin B.V. *Molekulyarnaya teoriya treniya i skol'zheniya* [Molecular theory of friction and sliding]. Zhurnal fizicheskoy khimii, 1934, Vol. 5, no. 9, pp. 1165–1176.
- 34. Deryagin B.V. *Chto takoye treniye?* [What is friction?] Moscow, USSR Academy of Sciences, 1963, 230 p.

#### **ABOUT THE AUTHOR**

#### **Dmitriy P. MARKOV,**

Dr. Sci. (Eng.), Chief Research Associate, JSC "Railway Research Institute"

Received 03.06.2019 Accepted 28.08.2019

# ВЫШЛИ В СВЕТ ТРУДЫ ВНИИЖТ

**АСУ** «Экспресс» — автоматизированная система управления пассажирскими перевозками на железнодорожном транспорте / под ред. А.В. Комиссарова. 2-е изд. М.: РАС, 2019. 68 с.

Коллектив авторов:

Г.А. Антонова, А.С. Бабенко, М.П. Берёзка, М.И. Бобренкова, Ю.А. Гаврина, Т.В. Гнисюк, М.А. Гупаленко, В.А. Добычина, С.Б. Елизаров, Н.Б. Караванова, Т.А. Карпеева, А.В. Комиссаров, С.П. Кузякова, Е.Ю. Льон, Н.Э. Магура, Е.А. Макарова, Е.А. Мартынова, О.В. Минаева, С.В. Муктепавел, О.В. Реванченкова, А.П. Рубинская, Е.М. Сивинцева, И.Н. Спесивцева, Е.И. Стасенкова, К.В. Суржин, М.В. Толмачёва, Г.М. Турсуматова, Е.В. Успенская.

В книге рассмотрены бизнес-процессы пассажирских перевозок с использованием автоматизированной системы управления пассажирскими перевозками «Экспресс-3».

Во втором издании актуализированы и расширены описания текущего состояния информационных технологий системы «Экспресс-3», книга стала более удобной для чтения.

Издание предназначено для руководителей и инженерно-технического состава пассажирского комплекса; специалистов, связанных с разработкой и внедрением информационных технологий на

российских железных дорогах; научных работников, преподавателей и студентов транспортных вузов.

**Певзнер В. О.** Научные основы системы управления состоянием пути. М.: PAC, 2018. 272 с.

Рассмотрены цели и задачи систем управления состоянием пути, организации технического обслуживания пути, методы оценки воздействия подвижного состава на путь и возможности их совершенствования, вопросы работы пути в условиях повышения осевых нагрузок подвижного состава, опыт унификации ширины колеи на «Российских железных дорогах» и оптимизации возвышения наружного рельса в кривых, перспективные направления совершенствования системы оценки состояния пути и его технического обслуживания.

**Вопросы развития железнодорожного транспорта:** сб. тр. ученых АО «ВНИИЖТ» / под ред. М. М. Железнова, Г. В. Гогричиани. М.: РАС, 2017. 272 с.

Рассмотрены важные экономические факторы, влияющие на развитие железнодорожного транспорта, проблемы, связанные с подвижным составом, тягой поездов, а также вопросы пути, путевого хозяйства и металловедения.

Сборник рассчитан на научных и инженерно-технических работников железнодорожного транспорта.

По вопросам приобретения книг обращаться по адресу: 129626, г. Москва, 3-я Мытищинская ул., д. 10, редакционно-издательский отдел АО «ВНИИЖТ».

Тел.: (499) 260-43-20, e-mail: rio@vniizht.ru, www.vniizht.ru.