

ВІДЗІВ

офіційного опонента про дисертацію Ляшенка Якова Олександровича
«Фазові переходи між кінетичними режимами межового тертя»,
яку подано на здобуття наукового ступеня доктора фізико-математичних наук
зі спеціальності 01.04.07 – фізика твердого тіла

Дана дисертація стосується дослідження процесів межового тертя в рамках побудованого автором феноменологічного моделю, що ґрунтується на аналогії з теорією фазових переходів Ландау. Межове тертя — це трибологічний режим, коли товщина мастила не перевищує декількох атомових діаметрів, а через нерівності тертьових поверхонь він може спостерігатися майже у всіх вузлах тертя. (Та у більшій частині дисертації описано випадок, коли контактувальні поверхні тертя є атомарно гладкими і не містять нерівностей.) При цьому в роботі розглянуто різні ефекти, що спостерігаються експериментально (ефекти пам'яті, неоднорідність розподілу зсувних напружень у межовому мастильному шарі, термодинамічне топлення та зсувне розрідження тощо). Слід зазначити, що за літературними даними відповідні системи використовуються в різноманітних мікро- та наномеханічних пристроях, наприклад у комп'ютерних запам'ятовувачах, аерокосмічних приладах та ін. Здатність межового мастила перебувати в різних кінетичних станах призводить до прояву переривчастого взаємного руху тертьових поверхонь, який також притаманний системам, що працюють у режимі сухого тертя. Такий рух є однією з основних причин передчасного руйнування контактувальних поверхонь, що працюють у режимі межового тертя. І в даній роботі побудовано «фазові» діаграми, за якими передбачено такий режим, що свідчить про *прикладний* аспект одержаних результатів. З іншого боку, одержані результати також мають *фундаментальну* значущість, оскільки уможливають просунутися у розумінні процесів, що відбуваються в нанотрибологічних системах, але досі залишалися незрозумілими сповна. Отже, в дисертаційній роботі п. Я. О. Ляшенко певно мав за мету побудову феноменологічної теорії межового тертя атомарно гладких твердих поверхонь за наявності ультратонкого мастильного шару між ними. Систематичні дослідження таких систем є *актуальними* впродовж останніх десятиріч, що пов'язане із бурхливим розвитком техніки, коли з'являються нові експериментальні методики, що уможливають працювати на зазначених масштабах. А розвиток комп'ютерної техніки та методи молекулярної динаміки сприяють моделюванню таких систем, що було неможливим ще пару десятиліть тому.

Маю відзначити, що частину результатів, яких представлено в дисертації п. Я. О. Ляшенка, одержано у знаній групі проф. В. Л. Попова, який нині є завідувачем кафедри фізики тертя та динаміки систем Технічного університету Берліна. Так, перші розділи дисертації ґрунтуються саме на теоретичних працях проф. Попова, який вперше у 2000 р. запропонував використовувати теорію фазових переходів Ландау 2-го роду для опису явищ межового тертя, а також на наявних експериментальних даних багатьох інших авторів. Хоча робота п. Я. О. Ляшенка є теоретичною, по всій його дисертації проводиться порівняння одержаних результатів із відомими експериментальними даними, а там, де це можливе, — і з даними комп'ютерних експериментів. Також невелику частину результатів одержано у співпраці із д-ром Б. Перссоном, із ім'ям якого пов'язується створення напряму в сучасній трибології та контактній механіці, що стосується фізики тертя шерстких поверхонь (теорія Перссона).

Треба також зазначити, що за результатами планових держбюджетних науково-дослідних робіт кафедри моделювання складних систем факультету електроніки та інформаційних технологій Сумського державного університету за участю п. Я. О. Ляшенка під його керівництвом п. Н. М. Манько було захищено дисертацію «Синергетичне представлення переривчастого режиму межового тертя» на здобуття наукового ступеня канд. фіз.-мат. наук (з спеціалізацією 01.04.07 – фізика твердого тіла (на засіданні 05.06.2015 р. у спеціалізованій вченій раді Д 55.051.02 Сумського держуніверситету), на засіданні спеціальної ради

16.04.2017 20 р.

29.01.2016 р. під науковим керівництвом п. Я. О. Ляшенка захистив кандидатську дисертацію «Фазові переходи в ультратонких твердоподібних плівках мастила при межовому терті» зі спеціальності 01.04.07 – фізика твердого тіла його аспірант п. А. М. Заскока.

Докторська ж дисертація п. Я. О. Ляшенка є закінченим теоретичним дослідженням і містить елементи *новизни*, які пов'язані, насамперед, із описом ефектів, що спостерігаються експериментально, у рамках теорії межового тертя, побудованої з огляду на «фазові» перетворення стану межового мастила. Розв'язання задач, яких було поставлено у даній дисертаційній роботі чимало, привело до одержання наступних *нових* і, як на мене, найцікавіших наукових результатів стосовно властивостей трибологічних систем.

1. За аналогією з теорією фазових переходів Ландау і з використанням амплітуди просторової модуляції густини чи то надлишкового об'єму мастильного середовища як його параметра порядку було описано «фазове» перетворення 1-го роду структурного стану межового мастила, затиснутого між атомарно гладкими твердими поверхнями, при їх зсувах; знайдено зв'язок між таким чином визначеними параметрами порядку та показано, що в широкому діапазоні значень параметрів такої динамічної трибологічної системи може відбуватися переривчастий режим взаємного руху тертьових поверхонь, що є однією з причин руйнування деталей, що труться у (мікро)механізмах в умовах експлуатації.
2. Із урахуванням залежності в'язкості межового мастила від температури та градієнту швидкості зсуву було показано, що за низьких температур у трибологічній системі діє сила статичного тертя, що уможливило теоретично описати особливості повсюдно здійснених експериментів типу «стоп–старт» і пояснити ефекти пам'яті, спостережених експериментально у режимі межового тертя, саме через силу тертя спокою та багаторазове збільшення часів релаксації основних характеристик у режимі спокою.
3. Із урахуванням в рамках розробленого моделю «фазових» перетворень у режимі межового тертя впливу просторової неоднорідності розподілу параметра порядку за площею мастильного матеріалу, що перебуває у зоні контакту твердих тіл, було показано, що після першого акту розрідження мастила через багаторазове збільшення відносної швидкості зсуву структура мастильного матеріалу стає одноріднішою, і потім встановлюється періодичний переривчастий режим руху, що підтверджується в експериментах.
4. Із урахуванням нетривіального впливу зовнішнього навантаження на контактувальні поверхні при їх зсуві на стаціонарні режими переривчастого тертя було показано, що за наявності межового мастила між ними підвищення рівня навантаження приводить до зміни 1-го роду «фазового» перетворення кінетичного режиму тертя на 2-й рід «фазового» перетворення.
5. Із урахуванням пружності контактувальних тіл, розділених шаром межового мастила, при їх зсуві зі сталою швидкістю за методом редуції розмірності з'ясовано, що встановлюється неоднорідний за площею їхнього контакту розподіл пружних напружень, що приводить до виникнення у трибологічній системі фронтів топлення та тверднення, а це, в свою чергу, приводить до встановлення режиму з осцилювальною силою тертя, причому для поведінки системи критичним є співвідношення між часами релаксації пружної деформації та параметра порядку.
6. Із урахуванням впливу нанорозмірних нерівностей контактувальних поверхонь твердих тіл на процес межового тертя було показано, що вони можуть приводити до неоднорідного за площею контакту топлення мастильного шару, коли реалізується доменна структура із двома видами домен, ознакою яких є відповідні значення параметрів порядку, та порушується періодичність залежності сили тертя від часу.

Логіка викладення матеріалу в дисертації відображає певну послідовність проведеного дослідження; дисертацію побудовано таким чином, що кожний її розділ є певним узагальненням попереднього, і саме це об'єднує їх в єдину пос-

лідовну працю. Структура дисертації складається зі Вступу, шістьох розділів, переліку основних висновків, Списку використаних джерел і Додатка.

У *Вступі* обґрунтовано актуальність теми дисертації, сформульовано мету та задачі дослідження, визначено об'єкт, предмет та методи дослідження, висвітлено наукову новизну та практичну значимість одержаних при цьому результатів, наведено інформацію про зв'язок роботи з відповідними науковими програмами і темами та інформацію про апробацію роботи через участь дисертанта у конференціях і семінарах; також зазначено особистий внесок здобувача в опубліковані роботи, результати яких винесено на захист.

У *першому* розділі дисертації здобувачем проведено огляд літератури за темою дисертаційної роботи, який містить коротко охарактеризовані результати наявних у літературі теоретичних моделей межового тертя, а також опис найважливіших експериментальних даних. На прикладі апарату поверхневих сил Табора–Вінтертона–Ізраєлачвілі зазначено експериментальні методики, наведено різні моделі, які передбачають переривчастий режим межового тертя. Також на основі експериментальних результатів пояснено модель «фазових» перетворень, яку використано в подальшому дослідженні. Описано вплив на режим тертя зміни швидкості зсуву, температури мастила, зовнішнього навантаження, ефекти пам'яті тощо. Основну частину літературного огляду присвячено моделю В. Л. Попова, в рамках якого вибудовується подальше дослідження. У висновках до цього цікавого розділу дисертант вказує на те, що є чимало даних експериментів і теоретичних моделей стосовно межового тертя, але досі немає теорії, яка сповна описувала б широкий спектр властивостей, зокрема реологічних, яких демонструє трибологічна система, в тому числі нанорозмірна, в режимі межового тертя.

До *1-го розділу принципів зауважень немає*. Але маю зазначити, що в літературі вже накопичено величезну кількість результатів, яких було одержано молекулярно-динамічним моделюванням. І багато результатів, яких одержав п. Я. О. Ляшенко, принаймні якісно співпадають із даними подібних комп'ютерних експериментів. Та у літературному огляді він майже не обговорює результати інших авторів, яких було одержано завдяки комп'ютерним симуляціям, а лише наводить посилання на відповідні статті та монографії. На мій погляд, цікаво було б довідатися вже в цьому засадничому розділі (наприклад, у висновках до нього) про точку зору з досвіду здобувача, як сформованого фахівця найвищої кваліфікації, зокрема, стосовно розрахункових обмежень цієї важливої методики (та й ролі застосовуваних модельних припущень, наприклад, щодо короткосяжності міжчастинкових взаємодій або обмеженості розмірів системи чи то крайових умов). Крім цього, наводжу деякі недогляди здебільш редакційного характеру. У 1-му розділі сталися прикрі «втрати» деяких дефініцій, наприклад, фізичного змісту та числової оцінки порядку величини коефіцієнта g у співвідношеннях (1.87)–(1.91), «ключового» для з'ясування меж застосовності (тобто адекватності) відповідного моделю; обґрунтування реалістичними крайовими умовами обраних граничних значень хвильового числа k — «параметра» Фур'є-перетвору у виразі (1.86). В деяких місцях цього розділу (та й Вступу і наступних розділів) застосовано ненайкращу російськомовну термінологію та жаргонові словосполучення, наприклад, «атомарный диаметр», «молекулярная площадь контакта», «кинетическое структурное состояние», «дилатантная смазка» чи то «ньютоновская смазка», ба навіть невинний, але курйозний (як для наукового твору) вислів «изображение модели Рабиновича». Також, на жаль, через зловживання стилістикою, подібною до англомовної, нерідко застосовані коми є зайвими, іноді ж їх упущено там, де вони потрібні.

Другий розділ дисертації за розміром є самим великим, а за інформаційним змістом — її найголовнішою частиною, де, перш за все, наведено обґрунтування обраної феноменологічної методики досліджень на основі порівнянь із теоретичними й експериментальними результатами інших авторів. Зокрема, належну увагу приділено роботам М. Шьоена з колегами, в яких проведено комп'ютерне моделювання станів ансамблю частинок, обмеженого гладкими твердими повер-

хнями; в цих роботах було показано, що топлення такої системи може відбуватися за механізмом, подібним до фазового перетворення 2-го роду. Далі в даному розділі описано методіку оцінювання амплітуди періодичної частини густини мастильного середовища як параметра порядку. Пояснено, чому обмежені трибологічні системи, що розглядаються, за своєю поведінкою відрізняються від систем, в яких застосовуються об'ємні змащувальні матеріали. Розглянуто й «фазові» перетворення 1-го роду у рамках симетричного та несиметричного розвинень вільної енергії за степенями параметра порядку мастила. На коефіцієнти розвинень у всіх випадках, що розглянуто, накладено обмеження, за яких параметр порядку набуває значення 1 у твердоподібному стані мастила та плавно зменшує своє значення з підвищенням температури (термодинамічне топлення) або пружної деформації (зсувне розрідження) до нуля у рідиноподібному стані. Знайдено феноменологічні аналітичні вирази для тих «критичних» температури та швидкості зсуву, за яких відбувається топлення (розрідження) чи то твердження мастила. Оцінено стаціонарні значення параметра порядку залежно від температури та швидкості зсуву, які є керувальними параметрами, а також кінетичні залежності на прикладі двох механічних аналогів трибологічних систем, що демонструють пружність. Побудовано «фазові» діаграми, за якими, залежно від керувальних параметрів, реалізуються різні режими тертя при русі механізму фрикційної повідні зі сталою швидкістю. Із урахуванням реології двох конкретних типів мастил одержано формулу для обчислення сили тертя та розраховано графіки залежності сили тертя від температури та швидкості зсуву. З'ясовано, що одержані мапи тертя збігаються з аналогічними залежностями, яких було запропоновано іншими авторами при аналізі великої кількості експериментальних даних. Як на мене, одним із важливих результатів розділу є докладне пояснення механізму переривчастого режиму тертя на основі розробленого феноменологічного моделю. Показано, що переривчастий режим може ставатися за механізмами типу фазових перетворень як 1-го, так і 2-го роду. Також продемонстровано, що основні риси переривчастого режиму тертя при підвищенні температури та швидкості зсуву збігаються в цілому з одержаними іншими авторами у численних експериментальних роботах. За допомогою механічної системи типу пружинного фрикційного хитуну описано вплив періодичної зовнішньої дії на режими тертя, причому симетричне та несиметричне розвинення вільної енергії дають якісно аналогічні поведінки системи (останнє підтверджується експериментальними даними інших авторів для подібних трибологічних систем). Для випадку періодичної зовнішньої дії проведено числовий експеримент із в'язким (за Ньютоном) рідким мастилом, стисливим та псевдопластичним і показано, що псевдопластичне мастило справляє мінімальну силу тертя, але максимальні пружні напруження. За аналогією з фазовим перетворенням 2-го роду докладно розглянуто гістерезні явища межового тертя (чого раніше не було зроблено у відповідній роботі В. Л. Попова, в якій лише сформульовано модель «фазового» перетворення 2-го роду мастила). Продемонстровано, що з підвищенням швидкості зсуву відбуваються послідовні переходи між режимами сухого тертя, переривчастим і ковзання (з розтопленням мастилом). Наприкінці розділу зроблено дещо штучну за значенням спробу порівняти межовий режим сухого тертя, коли виконується Амонтонове співвідношення між силою тертя та зовнішнім навантаженням, із гідродинамічним режимом (в тому числі для неньютонового мастила).

Певно, оскільки розділ 2 є найбільшим, до нього виникло й декілька зауважень, хоча й непринципових. По-перше, дисертант будує модель і виконує подальше дослідження у розмірних змінних, і це уможливорює провести числове порівняння з експериментом, але він обмежується лише конкретними кількісними порівняннями. Проте, оскільки вже знайдено аналітичні вирази для «критичних» температур і швидкостей щодо топлення (чи то розрідження), завдяки узагальненню певної кількості експериментальних даних можна було б оцінити коефіцієнти розвинення термодинамічного потенціалу та похідних величин для тих чи інших експериментальних обставин. І вигляд відповідних кривих зале-

жностей, одержаних п. О. Я. Ляшенком, вказує на те, що такі оцінювання цілком можливо зробити. На мій погляд, це поліпшило би дисертаційну роботу. *По-друге*, при розв'язуванні кінетичних рівнянь для оцінювання пружної деформації замість розв'язку рівняння (2.15) дисертант використовує її стаціонарне значення (2.16), припускаючи справедливим дуже малий час релаксації пружної деформації. Але для трибологічних систем, що розглядаються, наприклад у випадку полімерних мастил з видовжених молекул, час релаксації не такий вже й малий, і взагалі-то потрібно оцінити вплив скінченності цього часу релаксації на еволюцію системи. Якщо час релаксації деформації буде одного порядку величини із часом релаксації параметра порядку, система набуде додаткового ступеня вільності, і її поведінка може істотно змінюватися. В даній дисертації це не було вивчено, хоча таке дослідження уможливило б спрогнозувати нові режими, навіть неznайдені ще експериментальним шляхом. *По-третє*, емпірична формула (2.30), що описує силу тертя поверхонь за Граніком–Ізраелачвілі, використовується у кількох підрозділах дисертації, але, якщо вираз для пружної компоненти такої сили тертя змінюється від задачі до задачі, то її в'язка складова розглядається у однаковому вигляді, хоча, очевидно, вона залежить від реологічних властивостей мастила, які можуть різнитися. Так, зокрема, у підрозділі 3.2 п. О. Я. Ляшенко використовує емпіричний вираз (3.4) для сили тертя із врахуванням в'язкості навіть у дещо узагальненому (за Б. Перссоном із колегами) вигляді, та корисно було б мати коментар дисертанта про те, як зміняться результати розрахунків за модельними виразами Граніка–Ізраелачвілі–Перссона із колегами при застосуванні інших реологічних моделей поведінки мастильного матеріалу того чи іншого типу. *По-четверте*, розвинення вільної енергії за степенями параметра порядку — це апроксимація, яка справджується в обмежених діпазонах зовнішніх термодинамічних параметрів, але тут таких обмежень не зазначено; це є прийнятною екстраполяцією, коли немає експериментальних даних для порівняння, проте в даному разі вони певно є, і було б коректніше вказати на допустимі області значень температури мастила, швидкості зсуву тощо.

У *третьому* розділі дисертант використовує узагальнення розробленого у другому розділі моделю відповідно до емпіричної залежності в'язкості трьох конкретних типів межових мастил не тільки від градієнту швидкості, а й від температури. Тут описано реалістичний випадок, коли сила тертя зменшується з підвищенням температури після топлення мастила, і зазначено відмінності від розгляду у другому розділі. Це уможливило відокремити вплив відповідної залежності в'язкості на спостережні ефекти на відміну від тих ефектів, які відбуваються саме через «фазове» перетворення між структурними станами мастила, яких описано в розділі 2. З одержаних принципово нових результатів зазначаю, що врахування залежності в'язкості від градієнту швидкості та температури уможливило з'ясувати, що за низьких температур і швидкостей зсуву проявляється ненульова компонента сили тертя, яку п. Я. О. Ляшенко трактує як статичну компоненту. Оцінено числове значення (3.7) цієї складової сили тертя. Завдяки врахуванню такої компоненти стало можливим описати ефекти пам'яті, що спостерігаються експериментально в системах, що розглядаються, тобто фактично запропоновано механізм, який пояснює ефекти пам'яті. Також розглянуто умови, за яких ненульова сила тертя з'являється навіть у стані спокою через те, що у ньому реалізується ненульове значення параметра порядку. Це з'ясовано при врахуванні лінійного за параметром доданку у виразі для вільної енергії за наявності впливу електричного поля — зовнішнього, яке генерується навколишніми тілами, чи то внутрішнього, утвореного через узгоджену орієнтацію довгастих полімерних молекул-диполів мастила (друга можливість дійсно спостерігається експериментально, і про неї свідчать результати молекулярно-динамічного моделювання у працях багатьох авторів). Дисертант також показав, що час зупину зовнішньої повідні впливає на поведінку трибологічної системи після продовження руху (саме під цим експериментатори, які досліджують подібні системи, і розуміють ефекти пам'яті). Одержані залежності якісно збіга-

ються з відомими експериментальними даними. (У розглянутому випадку на коефіцієнти розвинення вільної енергії за степенями параметра порядку накладаються певні умови, які обмежують максимальне значення параметра порядку, що вже не сягає одиниці.)

До 3-го розділу принципів зауважень немає. Натомість маю зазначити, що в розділі 3 розглянуто механізми двох родів, які приводять до наявності у системи пам'яті; тому було б корисно зробити їх порівняння, та в дисертації воно відсутнє. До того ж, взагалі-то, в'язкість залежить від температури; тому слід було б розглядати обидва випадки із врахуванням температурної залежності в'язкості. Тоді для трибологічної системи проглядався б вплив двох чинників, — за рахунок в'язкості мастила та електричного поля одночасно, — що може привести до складнішої поведінки системи. Дисертант виокремив кожен випадок, що уможливило прослідкувати вплив саме окремого чинника; та доречно було б дослідити ще й гібридний (!) випадок, що зробило би опис впливу електричного поля реалістичнішим. Нарешті, при розвиненні вільної енергії за степенями параметра порядку із врахуванням лінійного доданку його відносний внесок не було пов'язано із фактором діючого електричного поля, хоча розгляд зміни поведінки трибологічної системи за різних значень параметрів цього поля, принаймні, у граничних випадках або на якісному рівні, був би корисним.

У четвертому розділі дисертації виконано дослідження тертя шерстких поверхонь із нанорозмірними нерівностями, а також виявлено кінетичні режими межового тертя із урахуванням просторової неоднорідності.

У першій частині цього розділу досліджено рух двох шерстких поверхонь, яких розділено межовим шаром мастила, причому віддаль між поверхнями у процесі руху є незмінною, і вони не контактують між собою безпосередньо, а лише через мастило. Взагалі-то, навіть така задача є надто складною; тому п. Я. О. Ляшенко застосував спрощувальні наближення: наближення невзаємодійних домен та наближення середньої товщини мастильного шару. В першому випадку можливими є обставини, коли мастило у процесі руху складається із домен, властивості яких задаються лише числовим значенням параметра порядку, тобто коли співіснують твердоподібні та рідиноподібні області, які дають різний внесок у загальну силу тертя. У рамках наближення середньої товщини мастило вважається однорідним. Цікаво, що в обох ситуаціях макроскопічна поведінка системи якісно не змінюється, а це свідчить про те, що у реальному експерименті важко з'ясувати, за рахунок яких саме внутрішніх процесів проявляються той чи інший ефект. Щодо цієї частини розділу є такі зауваження. На рисунку 4.9 дисертант наводить моментальні картини розподілу параметра порядку по площі контакту третьових поверхонь. Та не менш показовими є також просторові розподіли механічних напружень та й температури мастила; але, на жаль, відповідних мап тут не показано. До речі, для реалістичності опису обов'язково потрібно враховувати роботу, яка виконується при терті, та вплив дисипації механічної енергії на температуру окремих твердоподібних і рідиноподібних домен; на жаль, в цьому розділі таке врахування залишилося «за кадром». (Зазначу, що про це йдеться у шостому розділі дисертації, але для іншого граничного випадку гладких третьових поверхонь.)

В підрозділі 4.2 досліджено вплив просторової неоднорідності мастила, яку враховано градієнтним доданком у виразі для вільної енергії. Чисельним розв'язанням відповідних кінетичних рівнянь у частинних похідних одержано залежності сили тертя від часу, які виглядають начебто періодичними. Та детальне розглядання часових залежностей для окремих домен показало, що просторова неоднорідність мастила все ж таки впливає, але незначно. Отже, потрібно аналізувати не тільки макроскопічну поведінку трибологічної системи, а й виявляти та відслідковувати (в тому числі й теоретичними методами) ті внутрішні процеси в області контакту, що спричиняють нюанси поведінки системи, навіть які не завжди можна виміряти експериментальним шляхом, тому що сучасне експериментальне обладнання має обмежені можливості. Зауваження до підрозділу 4.2 полягають в тому, що дисертант використовує явну різнищеву схему для

числового розв'язку диференціальних рівнянь у частинних похідних, яка може бути нестійкою. Надійніше було б застосовувати неявну схему, яка потребує більше процесорного часу, зате є стійкою. (На двох сторінках розділу у подробицях описується процедура розв'язання рівнянь в рамках явної схеми, хоча можна було б обмежитися лише посиланням на цю методу, оскільки вона є відомою з підручників. Натомість, більше уваги мало б знайти обґрунтування періодичних крайових умов, застосованих тут до розподілу параметра порядку обмеженого мастила!)

У третій частині цього ж розділу, яка, на мою думку, є, хоч і невеликою, та найцікавішою частиною дисертації, розглядаються питання впливу пружності тіл, що контактують, на режими їх межового тертя. У порівнянні з іншими випадками, тут у трибологічній системі немає пружини, що моделює тангенціальну пружність контакту. Таку пружину замінено врахуванням по всьому контакту неоднорідного розподілу пружних напружень, які до того вважались однорідними. В рамках методи редукції розмірності проведено комп'ютерне моделювання, що показало можливість реалізації переривчастого режиму тертя. Модель, запропонований в цьому розділі, певно можна узагальнити на більш складні випадки, яких досліджено в інших частинах дисертації. До підрозділу 4.3 є зауваження-побажання стосовно методики моделювання. Тут вважається, що мастило є розтопленим, а пружні деформації переходять у пластичні, коли параметер порядку стає меншим за 0,01. Отже, поведінка системи стає залежною від цього конкретного обраного значення параметра. Більш строго було б скласти й розв'язати кінетичне рівняння для пружних деформацій, як це було зроблено у попередніх розділах, і тоді не було б потрібно «брати зі стелі» якесь «критичне» значення параметра порядку.

А в підрозділі 4.4 проаналізовано побудований дисертантом з колегами динамічний модель наноструктуровального вигладжування завдяки руху індентора, що може бути використано при одержанні зносостійких поверхонь задля трибологічних застосувань, зокрема, коли в результаті автоколивного процесу вигладжування поверхня стає хвилястою. Та маю зауважити, що тут п. Я. О. Ляшенко нехтує кількома важливими чинниками — пружністю деталю, що вигладжується, та сухим тертям у напрямних індентора. Також в моделюванні не враховано зміну пружних властивостей матеріалу після проходження індентора, а при кожному наступному проході вважається, що матеріал має такі ж самі властивості, зокрема твердість, які були при попередніх. До речі, у початкових статтях В. П. Кузнецова (співавтор дисертанта) з цієї ж проблематики на такі чинники вже зверталася увага. Напевне, їх врахування у подальшій роботі дисертанта важливим чином модифікує моделювання вигладжування.

У п'ятому розділі роботи досліджено вплив зовнішнього навантаження на тертьові поверхні. Насамперед, термодинамічний модель у цьому розділі, запропонований автором дисертації із колегами, відрізняється від моделю, застосованого у попередніх розділах роботи, який ґрунтується на моделю В. Л. Попова, та має істотну перевагу, бо тут явним чином враховано нормальні зовнішні напруження на поверхні тертя, чого не було у моделі Попова.

У перших двох підрозділах 5.1 і 5.2 досліджено кінетику процесу тертя на основі симетричного і несиметричного розвинень вільної енергії за степенями параметра порядку, яким в даному разі (услід А. Леметру) обрано надлишковий об'єм, що утворюється при розрідженні мастила через хаотизацію структури затверділого мастила дефектами та неоднорідностями. При використанні симетричного розвинення вільної енергії тут враховано певну відмінність від попередніх розділів дисертації, яка полягає в тому, що при підвищенні температури спочатку модуль зсуву має навіть сталі значення, потім при «фазовому» перетворенні 1-го роду стрибкоподібно зменшує своє значення, а відтак продовжує зменшуватися з підвищенням температури. (У випадку, коли параметром порядку використовувалася амплітуда модуляції густини, модуль зсуву при розрідженні зменшувався з підвищенням температури відразу, а коли вона сягала критичного значення, він набував нульового значення.) Для цих, фізично інших обставин,

яких розглянуто тут, побудовано «фазову» діаграму, карту тертя (типу Штрібекової діаграми для межового режиму), з'ясовано деталі кінетики відповідної трибологічної системи. Та головним тут є демонстрація того, що при зростанні тиску на мастило його розрідження як «фазове» перетворення 1-го роду може ставати «фазовим» перетворенням 2-го роду (як то зазначав ще М. Шьоен). (Треба нагадати, що топлення необмеженого тривимірного кристалічного тіла, як показав ще Л. Д. Ландау, є фазовим перетворенням 1-го роду. Та вплив обмежувальних стінок істотно змінює симетрію термодинамічних станів затиснутого тіла, і є критичний перехід, після якого може відбуватися фазове перетворення 2-го роду.) Також показано, що з підвищенням нормального тиску збільшується значення сили тертя, що корелює з експериментальними даними.

У *підрозділі 5.3* дисертант спробував встановити аналітично зв'язок між параметрами порядку мастила типу амплітуди модуляції густини та надлишкового об'єму. Тут використано порівняння розвинень вільної енергії за степенями амплітуди модуляції густини чи то надлишкового об'єму за припущення їхньої еквівалентності у відповідних умовах. Певно головним результатом цього підрозділу є знайдена форма потенціалу, в якій параметром порядку є амплітуда модуляції густини, що уможливорює описувати вплив на мастило через навантаження на третю поверхню. (Відповідні розвинення записано для випадків «фазових» перетворень 1-го і 2-го родів.) Показано, що за малих значень зовнішнього навантаження врахувати його вплив можна модифікацією числових значень коефіцієнтів розвинення вільної енергії як функції амплітуди модуляції густини. Та коли навантаження стає істотним, цього вже недостатньо, і потрібно враховувати додаткові доданки у виразі для вільної енергії, які множаться на значення зовнішнього тиску, а, отже, вони зникають при нульовому тиску.

Взагалі-то, є кілька коментарів-зауважень до 5-го розділу дисертації. Дисертація ґрунтується на двох підходах до опису межового тертя, яких розроблено у розділах 2, 3, 4 та 5, 6 відповідно. Завдяки їх зіставлянню було встановлено феноменологічний зв'язок (5.26) між параметрами порядку типу амплітуди модуляції густини та надлишкового об'єму мастила, наближено чинний для окремих випадків. Але в загальному випадку проблеми постають-таки. Наприклад, стани пружньо-в'язкого рідиноподібного мастила, які описуються мінімізацією його вільної енергії за виразом (5.28) в термінах амплітуди модуляції густини без певних сильних обмежувальних умов на неї, можуть ставати нестійкими, на відміну від стійких станів в'язко-пружного «твердотілого» мастила, яких можна описати мінімізацією його вільної енергії в термінах надлишкового об'єму за виразом (5.27). Дисертант частково пояснює у третьому підрозділі, чому таке може відбуватися — зокрема, через побудову обох моделей, виходячи з різних інтерпретацій стаціонарних станів мастильного матеріалу та відповідного характеру змін значень модуля зсуву в точці «фазового» перетворення мастила. Та мені здається, що цьому ще має бути знайдено пояснення, яке ґрунтуватиметься на більш фундаментальних уявленнях, в тому числі симетрійно-енергетичних і структурно-ентропійних. Крім того, у підрозділі 5.3 п. Я. О. Ляшенком проаналізовано розвинення вільної енергії за степенями надлишкового об'єму мастила як параметра порядку, в тому числі в околі точки «фазового» перетворення 2-го роду, але відповідного дослідження кінетики впорядкування не було проведено. Адже ж важливо було б з'ясувати, якими є відмінності у поведінці макроскопічних параметрів трибологічної системи типу сили тертя, бо дисертант наголошує на тому, що зазначене розвинення описує окремий фізичний випадок; у той час як зміну поведінки мастила за механізмом «фазового» перетворення 1-го роду розглянуто у рамках двох зазначених моделей, порівняльна аналіза часових змін за механізмом «фазового» перетворення 2-го роду у рамках моделю із параметром порядку типу надлишкового об'єму в даній дисертації відсутня. Нарешті, хоча у вихідних виразах цього розділу для вільної енергії системи градієнтні доданки (через її неоднорідність) включалися, та вплив їх не було враховано у наступному моделюванні поведінки системи.

У найменшому, проте вельми цікавому *шостому* розділі дисертації було

узагальнено модель на випадок еволюції відкритої нерівноважної трибологічної системи, що працює в режимі межового тертя та контактує із зовнішнім середовищем. Тут в розгляд введено температуру поверхонь, що труться, враховано канал дисипації енергії, за яким від мастила, що нагрівається за рахунок роботи, тепла енергія передається поверхням тертя, або, навпаки, від поверхонь тертя, розігрітих до температури, яка вища за температуру мастила, воно нагрівається. (Із надтонким шаром мастила ці процеси відбуваються дуже швидко і не вносять істотних відмінностей у поведінку системи.) У розділі також побудовано «фазові» діаграми, з яких видно, що із підвищенням навантаження на контактувальні поверхні системи її «фазове» перетворення 1-го роду може вироджуватися у «фазове» перетворення 2-го роду. (Такою аналізою фактично доповнено й висновки попереднього розділу дисертації.) У рамках запропонованої моделю записано повну систему кінетичних рівнянь і одержано часові залежності ключових характеристик трибологічної системи, які за своїм виглядом подібні до тих, яких було одержано раніше. Все ж таки зазначене узагальнення є корисним, бо демонструє, що вплив процесів теплопровідності є незначним, і ним часто можна нехтувати, що справджує результати, яких без врахування теплопровідності було одержано в попередніх розділах дисертації. Також тут показано, що розроблений модель межового тертя може бути використаним для опису процесів надпластичності, коли відбувається взаємне ковзання зерен, яких розділено міжзеренною «фазою», що можна вважати за мастильний матеріал, в якому відбуваються «фазові» перетворення. (Ця проблематика є дуже важливою, але в даній дисертації, на жаль, обговорюється достатньо стисло, причому п. Я. О. Ляшенко розглядає контакт двох зерен без впливу з боку інших зерен, хоча процес деформації об'ємного тривимірного зразка у надпластичному стані, певне, є значно складнішим.)

Маю зауваження- побажання й до розділу 6. На мою думку, корисно було б розглянути й процес передачі тепла від мастила до поверхонь тертя в гідродинамічному режимі, коли мастило має велику товщину, і вплив теплопередачі стає істотним. Звісно, це можна зробити в рамках ідеології того моделю, що запропонований в шостому розділі, навіть не спираючись на вираз для вільної енергії; тут буде достатньо використати залежність в'язкості мастила від температури у діапазоні, де не відбувається «фазове» перетворення мастила, що є цілком виправданим, оскільки у практичних застосуваннях мастило в гідродинамічному режимі завжди є розтопленим. Таке дослідження має показати, наскільки ж добре працює запропонована дисертантом теорія у звичайних реалістичних умовах, і тоді порівнянням із численними експериментальними даними для цього випадку можна буде оцінити параметри, які описують теплопередачу.

На закінчення зазначу, що практично всі зауваження, яких наведено вище, слід розглядати як побажання стосовно оформлення вмісту дисертації та щодо врахування їх при майбутньому розвитку обраного наукового напрямку; вони не можуть знизити загальної схвальної оцінки дисертаційної роботи.

Автор дисертаційної роботи одержав *оригінальні та трудомісткі* наукові результати. Теоретичні моделі, яких застосовано в дисертації п. Я. О. Ляшенка, видаються мені фізичними і забезпечують обґрунтованість сформульованих наукових висновків. *Вірогідність* одержаних основних результатів і висновків дисертації забезпечується використанням адекватних фізичних моделей і математичного апарату, узгодженням ряду одержаних результатів з наявними експериментальними даними та теоретичними висновками інших авторів.

Результати дослідження є новими, одержаними за допомогою адекватних наявних методів дослідження межового режиму тертя. Найціннішим у даній дисертації є те, що одержані теоретичні результати вже мають своє експериментальне підтвердження, оскільки роботу було націлено саме на пояснення наявних експериментальних результатів. У цілому дисертація справляє враження роботи, виконаної на високому науковому рівні, а її результати стануть корисними не тільки для фахівців у трибології та фізиці межового тертя, а й для спеціалістів у дослідженні нелінійних систем, що самоорганізуються, реологіч-

ної динаміки, фазових переходів, надпластичности тощо.

Дослідження, виконані в даній роботі, поглиблюють уявлення про механізми межового тертя в різних випадках, яких розглянуто в окремих розділах дисертації. Результати дисертаційної роботи можна використовувати як у подальших теоретичних і експериментальних дослідженнях режиму межового тертя в наукових установах України, наприклад ІФ, ІМФ ім. Г. В. Курдюмова, ДонФТІ ім. О. О. Галкіна НАНУ, НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського», НТУ «ХПІ», СумДУ МОНУ, так і при конструюванні систем позиціонування в мікромеханічних пристроях, проектуванні різних аерокосмічних приладів, у фрикційній мікроскопії, мікромеханічних та нанотехнологіях, біомеханіці тощо. Також одержані результати можна використати для завбачення властивостей нанотрибологічних систем, що працюють у режимі межового тертя, адекватного трактування вже наявних експериментальних даних та тих, що ще тільки з'являться. Теоретичні дослідження, проведені в даній дисертаційній роботі, можуть скласти основу відповідного розділу в межах навчального курсу «Теорія нелінійних систем».

Дисертацію побудовано логічно, написано науковою російською мовою і структуровано відповідно до вимог ДАК МОН України щодо оформлення дисертацій.

Результати дисертаційної роботи викладено, принаймні, в 28 статтях (з них 5 є одноосібними), опублікованих у фахових вітчизняних і міжнародних наукових журналах, багато з яких мають високі імпаکت-фактори. До опублікованих праць, які відображають наукові результати дисертації та є свідченням їх апробації, відносяться 16 тез і статей за матеріалами доповідей на міжнародних наукових конференціях.

Зміст та основні положення дисертації цілком і вірно відображено в авторефераті дисертації. (Хоча маю зазначити, що тут також часто-густо застосовано русизми та ненайкращу українськомовну фізичну термінологію й жаргонівні словосполучення, наприклад, «плавлення» замість «топлення», «диференціальне рівняння» замість «диференційне рівняння», «коефіцієнт жорсткості», а не «коефіцієнт цупкості», «шорсткість» замість «шерсткість», «приймає значення», а не «набуває значення» тощо.)

ВИСНОВОК

Отже, дисертація п. Я. О. Ляшенка являє собою самостійну, в цілому (у межах поставлених завдань) завершену працю з істотним внеском у розвиток феноменологічної теорії межового тертя у трибологічних системах, в яких перебігають «фазові» перетворення.

За актуальністю вибраної теми, науковою новизною та значимістю одержаних результатів, адекватністю обраних метод розрахунків, ступенем обґрунтованості й вірогідністю сформульованих наукових висновків і рекомендацій, повнотою їх викладу в опублікованих працях дисертація «Фазові переходи між кінетичними режимами межового тертя» задовольняє встановленим критеріям ДАК МОН України щодо дисертацій на здобуття наукового ступеня доктора наук, а саме, пп. 9, 10, 12, 13 «Порядку присудження наукових ступенів і присвоєння вченого звання старшого наукового співробітника», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 24.07.2013 р. № 567 із змінами (окрім п. 3), що внесені до постанов Кабміну України, затвердженими постановою Кабміну України від 12.09.2011 р. № 955. Тому я вважаю, що автор дисертації, Яків Олександрович Ляшенко, заслуговує на присудження йому наукового ступеня доктора фізико-математичних наук зі спеціальності 01.04.07 – фізика твердого тіла.

Заступник директора з наукової роботи
Інституту металофізики
ім. Г. В. Курдюмова НАН України,
д-р фіз.-мат. наук, проф.



В. А. Татаренко