Письма в ЖЭТФ, том 123, вып. 6, с. 437 – 438

Ответ на комментарий к статье “Подавление низкотемпературного роста трения Ван-дер-Ваальса аномальным скин-эффектом” (Письма в ЖЭТФ 122, 805 (2025))

С. Ш. Рехвиашвили[1)]

Институт прикладной математики и автоматизации Кабардино-Балкарского научного центра РАН, 360000 Нальчик, Россия

Поступила в редакцию 22 января 2026 г.
После переработки 22 января 2026 г.
Принята к публикации 2 февраля 2026 г.

Рассматриваются ограничения применимости локальной модели Друде в условиях аномального скин-эффекта для расчета силы бесконтактного трения между двумя металлическими пластинами. Показано, что корректное нелокальное приближение для диэлектрической функции (например, в теории Линдхарда) приводит к сильному подавлению диссипации и силы трения при низких температурах.

DOI: 10.7868/S3034576626030204

Автор [1] в своем ответе вполне справедливо указывает, что выражение для коэффициента трения, полученное в локальном приближении, не может быть формально модифицировано “вручную” без пересчета всего интеграла с учетом нелокальной диэлектрической функции. Вместе с тем, модификация приближенной формулы представляет собой физически мотивированную оценку порядка величины эффекта в режиме, где использованная модель принципиально неприменима. Основной целью работы [2] является не алгебраическая коррекция приближенной формулы (хотя автор [1] опирается именно на эту формулу), а указание на физическую неприменимость самой локальной модели Друде при $l \gg d$, где l – длина свободного пробега электронов, d – расстояние между пластинами.

Из ответа следует, что автор [1] не проводит физически значимого различия между равновесными силами притяжения Ван-дер-Ваальса–Казимира–Лифшица, обусловленными *отражением* флуктуационных электромагнитных волн, и диссипативными силами флуктуационного трения, которые возникают только при наличии *поглощения* и относительного движения. Утверждение автора [1] о том, что проводимость должна зависеть от волнового вектора как $\sigma \sim 1/k$ согласно “концепции неэффективности”, физически неверно. Для корректного учета аномального скин-эффекта в задаче о флуктуационном трении необходимо использовать объемную нелокальную диэлектрическую функцию $\varepsilon(\omega, k)$, описывающую микроскопический отклик вырожденного электронного газа. Так, например, в рамках точной квантовой теории (функция Линдхарда) для чистого металла при $T \to 0$ мнимая часть диэлектрической функции обращается в нуль в области $|\omega| < v_F k$, которая охватывает все эванесцентные моды, дающие основной вклад в флуктуационное трение при низких температурах. Следовательно, $\mathrm{Im}\varepsilon(\omega, k) \to 0$. Это означает, что в идеальном вырожденном электронном газе без рассеяния диссипация отсутствует. В более простом гидродинамическом приближении, учитывающем коллективное движение электронной жидкости, диэлектрическая функция имеет вид

$$\varepsilon(\omega, k) = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + i\omega\nu - \beta^2 k^2},$$

где $\beta \sim v_F/\sqrt{3}$ – скорость электронного звука, $\nu = 1/\tau$. В пределе сильной нелокальности ($\beta k \gg \omega, \nu$) получаем

$$\mathrm{Im}\varepsilon(\omega, k) \approx \frac{\nu\omega\omega_p^2}{\beta^4 k^4},$$

и, следовательно,

$$\sigma(\omega, k) = \frac{\omega}{4\pi}\mathrm{Im}\varepsilon(\omega, k) \propto \frac{\omega^2}{k^4}.$$

Таким образом, даже в феноменологической гидродинамической модели проводимость убывает с ростом k существенно быстрее, чем $1/k$.

Зависимость $E(k) \sim 1/k$ представляет собой готовое решение для поля в системе “вакуум–полубесконечный металл”, и оно уже содержит полное описание одной границы. Но при расчете флуктуационного взаимодействия имеет место общий и специальный формализм, который самостоятельно, исходя из геометрии двух поверхностей и свойств материалов ($\varepsilon(\omega, k)$), вычисляет диссипативную силу. Если подставить в нее готовое

1) e-mail: rsergo@mail.ru

решение $E(k) \sim 1/k$ (где уже "зашита" одна граница), а не объемное свойство $\varepsilon(\omega, k) \sim 1/k^m$ при $m \geq 2$, это нарушит внутреннюю логику общей формулы для силы трения и приведет к неверному результату. Здесь же отметим, что даже при менее сильном подавлении $\sigma(\omega, k) \sim 1/k$ трение снижается на несколько порядков, что достаточно для его экспериментальной недоступности.

Важно подчеркнуть,что при температурах $T \sim \sim 1\,\text{K}$, рассматриваемых в работе [1], классическая модель Друде теряет применимость не только из-за аномального скин-эффекта, но и потому, что вклад квантовых корреляций и нелокальности в диэлектрический отклик становится доминирующим. Хотя электронный газ в металле вырожден при любых $T \ll T_F$, именно при $T \to 0$ проявляется такое важное квантовое свойство, как отсутствие диссипативных каналов для возбуждений с $\omega < v_F k$. Этот эффект, предсказываемый функцией Линдхарда, недоступен в феноменологической модели Друде, которая искусственно сохраняет конечную диссипацию даже при $T = 0$. Именно квантовая теория корректно воспроизводит исчезновение диссипации при $T \to 0$ в согласии с термодинамикой. Использование модели Друде в этой области параметров является феноменологическим экстраполированием за пределы ее физической области применимости.

Основная физика, которая не затронута в ответе Дедкова, заключается в следующем. В режиме аномального скин-эффекта ($l \gg d$) электроны вблизи поверхности металла движутся практически без столкновений (баллистически) на расстояниях, превышающих межплоскостной зазор d. Это приводит к эффективному экранированию флуктуационного электромагнитного поля; оно почти не проникает в объем, а индуцированные токи носят невязкий, гидродинамический характер. В результате джоулева диссипация, которая является единственным источником трения в рамках флуктуационной электродинамики, резко подавляется. Это не "малое возмущение", а качественное изменение механизма отклика. Локальная модель Друде предполагает, что ток в каждой точке пропорционален полю в той же точке, что справедливо лишь при $l \ll \lambda_{\text{skin}}$ или $l \ll d$. При $l \gg d$ связь между током и полем становится нелокальной, и вклад s-поляризованных эванесцентных мод, доминирующий в [1], параметрически подавляется. Таким образом, даже если провести полный пересчет исходного интеграла с использованием нелокальной функции $\varepsilon(\omega, k)$ (например, в рамках модели Линдхарда или кинетического уравнения Больцмана), результат будет тем же: трение стремится к нулю при $T \to 0$ в чистых металлах, поскольку исчезает механизм рассеяния энергии.

Совокупное применение всех формул в [1] остается формально верным только в области параметров, где $l(T) \ll d$, например, при $T \gtrsim 10\,\text{K}$ или $d \gtrsim 1\,\text{мкм}$. Однако при $T \sim 1\,\text{K}$ и $d \lesssim 100\,\text{нм}$, что является основным предметом обсуждения в [1], локальная теория электропроводности теряет физический смысл. В [2] не оспаривается физическая и математическая корректность формул из [1] внутри их области применимости. Указывается лишь на то, что область применимости была неверно экстраполирована на параметры, где доминирует аномальный скин-эффект.

Изложенные выше аргументы в полной мере применимы и к другим публикациям автора статьи [1] по данной тематике, включая исследование "аномального нагрева" [3]. Поскольку нагрев обусловлен диссипацией энергии трения, то в условиях подавления трения при низких температурах существенного нагрева не возникает.

Финансирование работы. Данная работа финансировалась за счет средств бюджета Института прикладной математики и автоматизации Кабардино-Балкарского научного центра Российской академии наук. Никаких дополнительных грантов на проведение или руководство данным конкретным исследованием получено не было.

Конфликт интересов. Автор данной работы заявляет, что у него нет конфликта интересов.

1. Г. В. Дедков, "Низкотемпературное возрастание силы трения ван-дер-Ваальса при относительном движении металлических пластин", Письма в ЖЭТФ **114**, 779 (2021) [G. V. Dedkov, "Low-Temperature Increase in the van Der Waals Friction Force with the Relative Motion of Metal Plates", JETP Lett. **114**, 713 (2021); https://doi.org/10.1134/S0021364021230053].
2. С. Ш. Рехвиашвили, "Подавление низкотемпературного роста трения ван-дер-Ваальса аномальным скин-эффектом", Письма в ЖЭТФ **122**, 805 (2025) [S. Sh. Rekhviashvili, "Suppression of the Low-Temperature Increase in the van Der Waals Force by the Anomalous Skin Effect", JETP Lett. **122**, 810 (2025); https://doi.org/10.1134/S0021364025609686].
3. Г. В. Дедков, "Особенности кинетики радиационного нагрева металлических пластин при флуктуационно-электромагнитном трении", Письма в ЖЭТФ **121**, 166 (2025) [G. V. Dedkov, "Features of Radiation Heating Kinetics of Metal Plates under Fluctuation-Electromagnetic Friction", JETP Lett. **121**, 154 (2025); https://doi.org/10.1134/S0021364024604871].