

03.5

Эффект Лейденфроста на струнах

© А.В. Артамонов, А.С. Дмитриев, П.Г. Макаров

Национальный исследовательский университет „МЭИ“, Москва, Россия

E-mail: asdmitriev@mail.ru

Поступило в Редакцию 17 мая 2023 г.

В окончательной редакции 14 июля 2023 г.

Принято к публикации 15 июля 2023 г.

Впервые описаны новые проявления эффекта Лейденфроста (левитация ограниченных объемов жидкости над перегретой поверхностью) на гладких и морфологически сложных тонких металлических струнах. Представлены различные динамические режимы левитации Лейденфроста, в том числе новый — комбинированный термогидродинамический механизм левитации как сумма эффектов вязкого течения пара под каплей и конвективного обтекания смесью пар + воздух капли за счет естественной конвекции.

Ключевые слова: эффект Лейденфроста, тонкие струны, морфология поверхности, механизм левитации, паровой слой.

DOI: 10.21883/PJTF.2023.18.56171.19629

Исследования в области капельно-струйных потоков находят практическое применение в разработке систем альтернативной энергетики, технологий получения новых материалов, а также для решения проблемы активного термоменеджмента. В случае значительного перегрева твердой поверхности жидкость не соприкасается с ней: вязкое течение пара под каплями создает подъемную силу, которая уравнивает вес капель [1–3]. Вязкое течение создается растеканием пара вдоль поверхности, что и обеспечивает подъемный механизм. Для слабо неоднородных поверхностей (мезо-, микро- или наноструктурированные поверхности) этот механизм видоизменяется, но в целом сохраняется. В работе [4] впервые продемонстрирован эффект падения капель жидкости на перегретые металлические проволоки, но зафиксировать даже квазистационарную левитацию не удалось. В настоящей работе впервые показано, что эффект Лейденфроста может иметь место как на гладких тонких металлических струнах, так и на морфологически сложных (например, струнах с обмоткой или нанесенными наноструктурами). Расчеты показали, что вязкое течение пара под каплей может обеспечить только часть силы левитации; остальная часть суммарной подъемной силы обеспечивается „всплытием“ капель за счет естественной конвекции смеси пар + воздух и течением пара вдоль струн, что стабилизирует процесс.

Основным элементом экспериментальной установки являются два участка одной нихромовой струны, натянутые параллельно друг другу между керамическими держателями с выпиленными на расстоянии 1 мм направляющими пазами. Концы струны закреплены в винтовой системе натяжения на керамических изоляторах.

Струны нагреваются путем подачи на них разности потенциалов. Для этого концы струны, закрепленные

в системе натяжения, подключены к электрической схеме, состоящей из блока трансформаторов: понижающего и ЛАТР (лабораторного автотрансформатора регулируемого). Система натяжения необходима, так как при нагреве металлическая струна будет провисать. Нанесение на струны капель заданного объема от 3 до $5 \mu\text{l}$ производится с высоты 3–5 см с помощью дозатора.

В работе исследовалось поведение капель на разных конфигурациях струн: 1) гладкие; 2) с прерывистой обмоткой; 3) с плотной обмоткой (рис. 1, а). Диаметр основных, осевых, струн был 0.4 мм. Диаметр проволоки, применявшейся для создания рельефной боковой поверхности, также выполненной из нихрома, составлял 0.1 мм. В случае прерывистой обмотки витки тонкой проволоки укладывались с шагом 0.1 мм, в случае плотной — вплотную друг к другу. Длина нагреваемого участка была 3.3 см. На рис. 1, б показан внешний вид капли, левитирующей на перегретых гладких струнах (камера Point Grey Flea3). На рис. 1, в представлен график измерения ТХА-термопарами температуры струн различной конфигурации в зависимости от подаваемого напряжения. Согласно ему, для достижения одной и той же температуры струнам с обмоткой требовалось большее напряжение. Вероятно, это связано с увеличением площади, рассеивающей тепло. Благодаря этому свойству можно обеспечить более тонкую настройку температуры.

При комнатной температуре возможно два вида взаимодействия капель и струн: смачивание сверху и провисание снизу под струнами. Эти режимы зависят от расстояния между струнами и от объема капли. Отметим, что для гладких струн явно наблюдается контактная мода Юнга (смачивание на гладких поверхностях), а для неоднородных струн (с обмот-

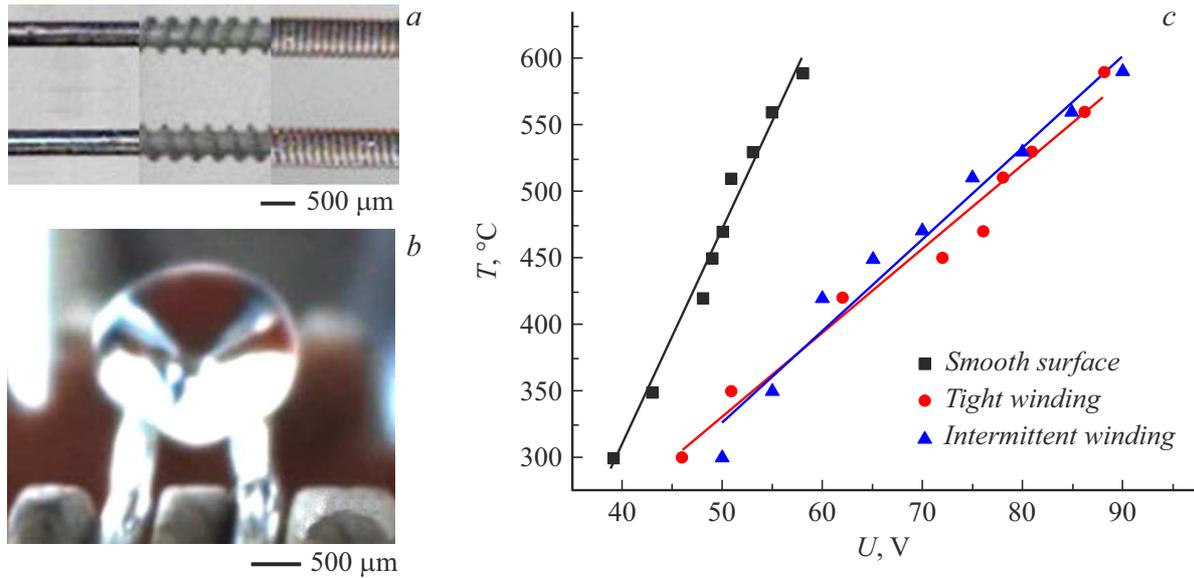


Рис. 1. Эффект Лейденфроста на струнах. *a* — металлические струны (гладкие, с прерывистой и со сплошной обмоткой); *b* — вид капли на перегретых гладких струнах; *c* — зависимость температуры струн от их конфигурации и подаваемого напряжения.

кой) установить моду смачивания оказалось невозможно (однако ниже температуры Лейденфроста, по нашему мнению, это мода Венцеля) [5]. Оба типа взаимодействия наблюдались только в случае контакта капли с двумя струнами, поэтому далее в настоящей работе рассматривается аналогичное взаимодействие.

Дальнейшие эксперименты проводились при нагреве струн выше температуры Лейденфроста для трех указанных выше типов струн. Для гладких струн наблюдается эффект Лейденфроста во всем диапазоне температур (300–590°C), при этом капля либо покоилась, либо совершала хаотические колебательные движения вдоль струн. В результате испарения диаметр капли уменьшался. По достижении размеров, примерно равных расстоянию между струнами, капля проваливалась между ними. Для струн с непрерывной обмоткой при температурах 300–350°C эффект Лейденфроста не наблюдается — капля испаряется при контакте с ними. При увеличении температуры струн до 420°C наблюдается левитация. Этот эффект фиксируется достаточно четко: ниже температуры Лейденфроста капли на струнах неподвижны, при температурах выше температуры пленочного кипения капли осуществляют быстрое перемещение вдоль струн (характерные скорости составляют десятки см/с). По результатам наблюдений в таком случае капли движутся вдоль заданного направления примерно в двух из трех случаев, в оставшейся трети экспериментов капля проваливалась. При дальнейшем увеличении температуры струн стабильность удержания капель на струнах увеличивается (~ 90%).

Полученные экспериментальные результаты подтверждают наличие левитации капель над натянутыми металлическими струнами. Вместе с тем если рассмотреть классический механизм левитации капель в эффекте Лейденфроста, в котором основную роль играет вязкое течение пара под каплей, создающее подъемную силу, уравнивающую вес капли, то понятно, что суммарная сила связана с площадью капли, обтекаемой вязким потоком пара.

Расчеты согласно существующим моделям для режима вязкой левитации [1–3,6] не позволяют объяснить левитацию капель, так как площадь подложки существенно меньше, чем в случае плоской нагретой поверхности. Вычисления в рамках указанных выше моделей показывают, что учет площади контакта капли с потоком пара поперек струн может давать поддерживающую силу, только на 60–70% обеспечивающую баланс между весом и указанной силой. Вопрос о дополнительной силе, которая способствует левитации, является основным в эффекте Лейденфроста на тонких струнах. Общее соотношение для баланса сил (рис. 2, *a*) в этом случае можно записать в виде

$$(\rho_l - \rho_v) V g = 2\pi \oint_S [p_{eff}(r) + p_{conv}(r)] dr$$

$$\approx 2 \int_0^{r_{eff}} p_{eff}(r) + \int_0^{r_{conv}} p_{conv}(r) dr. \quad (1)$$

Здесь r_{eff} — радиус эффективной поверхности испарения, близкий к радиусу одиночной струны, r_{conv} — область конвективного теплообмена (примерно среднее

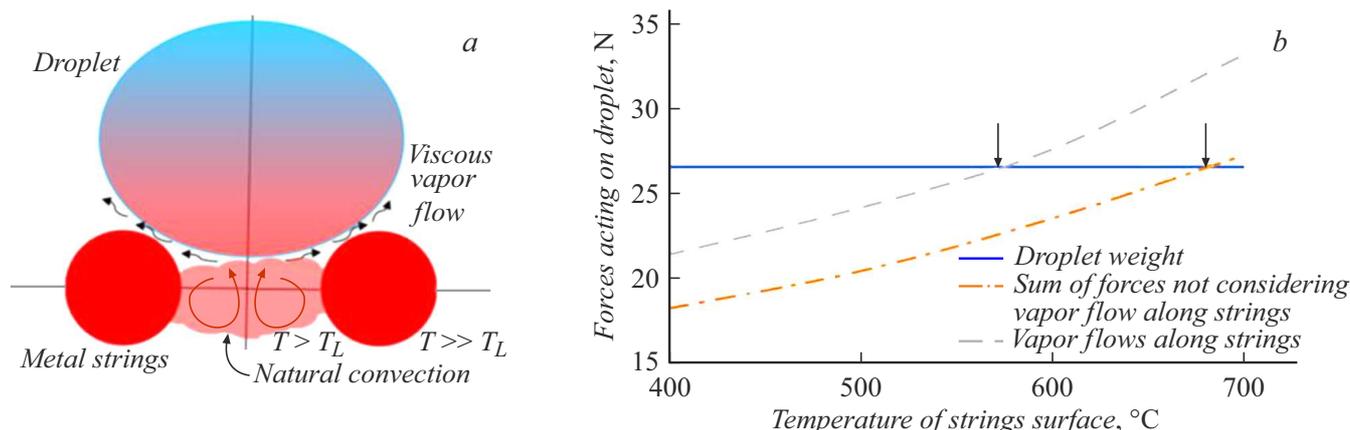


Рис. 2. Левитация на струнах. *a* — схема; *b* — баланс сил как функция температуры.

расстояние между струнами). За счет высокой температуры струн под каплей образуется достаточная горячая зона и возникает естественная конвекция, которая приводит к дополнительному давлению горячего газа (воздух + пар) под каплей. Это давление — второй член в соотношении (1). Заметим, что для достаточно малых капель может возникать и третий член, отвечающий за левитацию, — испарительное давление (реактивный импульс, который возникает при испарении капли). Помимо этого учтен вклад вязкого потока пара вдоль струн под каплей (для капли $3.5 \mu\text{l}$, рис. 2, *b*). Радиальный и аксиальный потоки пара создают давление, которое можно вычислить согласно соотношению

$$p(r) = 6[(j_m v_v)/(\rho_v \delta^3)] \{r_{eff}^2 - r^2\}. \quad (2)$$

Здесь j_m , v_v , δ — массовый поток пара, скорость потока пара и толщина парового слоя, которые могут быть вычислены с помощью стандартных процедур [1,3].

Для расчета давления на каплю со стороны конвективного потока можно воспользоваться соотношениями для конвективного теплообмена при естественной конвекции от цилиндра. Конечно, в общем случае нужно решать численную задачу о распределении пара и воздуха, но для оценок можно использовать простые эмпирические соотношения для естественной конвекции от нагретого цилиндра [7].

Из рис. 2, *b* хорошо видно, что без учета растекания пара вдоль струн баланс силы левитации и веса капли наступает только при температурах выше 690°C (показано стрелками). С другой стороны, при учете течения пара вдоль струны появляется дополнительная сила от вязкого течения, которая ведет к возникновению левитации при температурах выше 580°C , что вполне соответствует экспериментам.

Отметим, что в рамках исследований были проведены эксперименты с варьируемыми диаметрами и количеством струн [8,9]. По существу, ситуация в этих экспе-

риментах подтвердила основные данные, приведенные в настоящей работе.

Благодарности

Авторы благодарят за полезные обсуждения и замечания Е.В. Аметистова, А.П. Крюкова, В.В. Кузнецова, В.И. Терехова, В.В. Ягова и участников РНКТ-8.

Финансирование работы

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 23-19-00840).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] D. Quéré, *Annu. Rev. Fluid Mech.*, **45** (1), 197 (2013). DOI: 10.1146/annurev-fluid-011212-140709
- [2] L. Maquet, M. Brandenbourger, B. Sobac, A.-L. Bianco, P. Colinet, S. Dorbolo, *Europhys. Lett.*, **110** (2), 24001 (2015). DOI: 10.1209/0295-5075/110/24001
- [3] C. Wong, M. Adda-Bedia, D. Vella, *Soft Matter*, **13** (31), 5250 (2017). DOI: 10.1039/C7SM00990A
- [4] S. Lee, J. Cha, K. Kim, W. Choi, *Int. J. Heat Mass Transfer*, **131** (1), 226 (2019). DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.11.063
- [5] А.С. Дмитриев, *Введение в нанотеплофизику* (БИНОМ, М., 2015).
- [6] M. Shirota, M. van Limbeek, C. Sun, A. Prosperetti, D. Lohse, *Phys. Rev. Lett.*, **116** (6), 064501 (2016). DOI: 10.1103/PhysRevLett.116.064501
- [7] С.С. Кутателадзе, *Основы теории теплообмена* (Атомиздат, М., 1979).

- [8] А.С. Дмитриев, П.Г. Макаров, И.С. Тереховец, в сб. *Тр. 7-й Рос. нац. конф. по теплообмену* (Изд-во МЭИ, М., 2018), т. 1, с. 494.
- [9] А.В. Артамонов, А.С. Дмитриев, А.П. Дроздов, П.Г. Макаров, в сб. *Материалы 8-й Рос. нац. конф. по теплообмену* (Изд-во МЭИ, М., 2022), т. 1, с. 280.