

Левитация некипящих капель: устойчивость и манипуляция

Крюк Борис, Крюк Фёдор
ГБОУ Школа №171 СП 15, 11 класс

Научный руководитель: Могилевский Евгений Ильич
К.ф.-м.н., доцент механико-математического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова

Аннотация

Мы изучаем поведение капель летучих жидкостей (спирта и воды), помещенных над нагретой поверхностью другой жидкости (силиконового масла). Масло поддерживается при постоянной температуре, ниже температуры кипения капли. В нашей экспериментальной установке капли миллиметрового радиуса способны левитировать длительное время (от нескольких минут для воды и от десятков секунд для спирта) за счет конвективных потоков в нижней жидкости, постепенно уменьшаясь за счет испарения. Вероятность возникновения левитации зависит от способа помещения капли и свойств нижней жидкости. При увеличении вязкости нижней жидкости эта вероятность уменьшается, однако растет среднее время левитации тех капель, для которых она наступает. В работе обсуждаются факторы, влияющие на стабильность левитации. Предложен способ манипуляции каплями во время левитации через управление конвективными потоками в нижней жидкости: капля фиксируется над центром конвективной ячейки, увеличение интенсивности потока которой повышает устойчивость. Капля отслеживает положение центра ячейки при перемещении конвективной ячейки по сосуду.

Введение

Во многих микро гидродинамических устройствах, например, lab-on-chip, необходимо проводить манипуляции над каплями жидкости, в частности, перемещать и смешивать отдельные капли [1]. Для перемещения капель по твердой поверхности необходимо прикладывать достаточно большую в расчете на единицу массы силу, так как сила трения между каплей и поверхностью пропорциональна площади соприкосновения. Для уменьшения последней используются супергидрофобные поверхности [2], когда за счет специального текстурирования делается краевой угол близкий к развернутому и площадь соприкосновения уменьшается, или применяются механизмы, приводящие к левитации капли, то есть созданию прослойки газа между каплей и подстилающей поверхностью. Левитация наблюдается в следующих системах:

- акустическая левитация - капля висит в воздухе, удерживаясь в специально созданной конфигурации акустического поля[3].
- левитация над колеблющейся жидкостью - под каплей находится слой жидкости, который совершает колебания в вертикальной плоскости. Между

капель и жидкостью имеется воздушная прослойка, которая возобновляется при каждом колебании [4].

- эффект Лейденфроста - капля висит над горячей твердой поверхностью, с нижней поверхности капли происходит активное испарение, образующийся пар удерживает каплю от соприкосновения с твердой поверхностью [5,6].
- левитация за счет сдвигового или конвективного течения жидкости - капля находится над свободной поверхностью жидкости, отделенная воздушным зазором; воздух в зазор нагнетается за счет трения о нижнюю жидкость [7,8,9].

В работе рассматривается левитация над конвективным течением жидкости и ставится цель указать способы манипуляции движением капли в этом случае.

Установка

Для проведения работы мы собрали установку (рис. 1), которая состояла из емкости с жидкостью, необходимой для создания нижней ванны, причем границы емкости были выше первоначального уровня жидкости в ванне, и сопутствующих измерительных приборов.

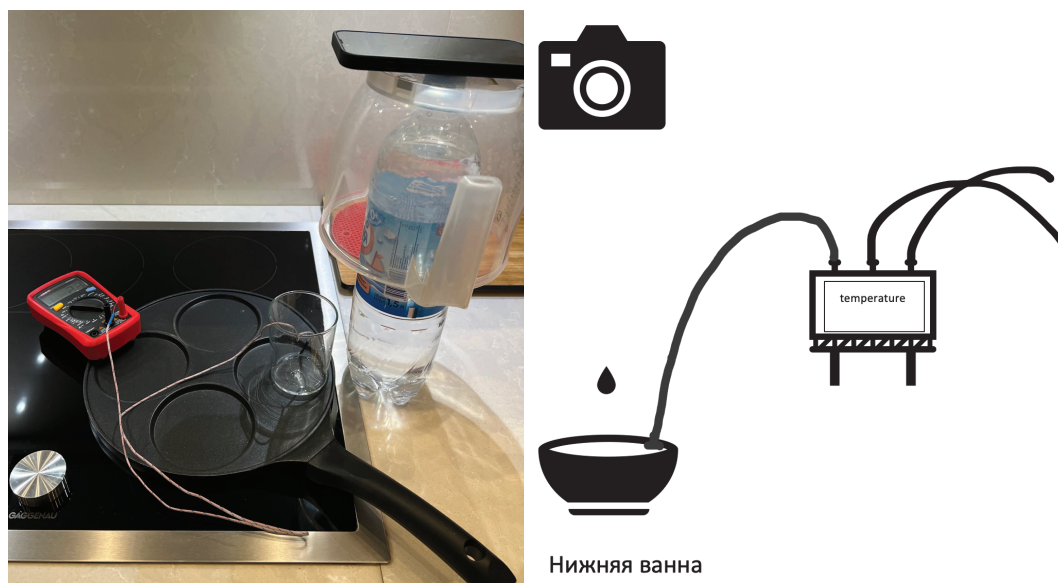


Рис. 1. Схема и фотография установки

Для начала мы исследовали поведение капель летучей жидкости (воды и спирта), помещенных над нагретой ванной. Нижняя жидкость, которая наполняла ванну, была представлена силиконовыми маслами разной вязкости V5, V10, V20, вязкости которых в 5, 10, 20 раз соответственно больше вязкости воды. Жидкость в ванне нагревалась сбоку и снизу и поддерживалась при температуре ниже температуры кипения капли. Температура измерялась термопарой, помещенной в центре стакана немного ниже свободной поверхности. Для визуализации использовалась алюминиевая пудра, для управления структурой течения в ванну помещались кубики льда или хомут с меняющимся радиусом.

Наблюдения

Согласно нашим наблюдениям, некоторые капли не начинают левитировать и тонут, спустя малое время (единицы секунд для спирта и для воды), или же сразу после контакта с жидкостью. Другие капли висят продолжительное время (от нескольких минут до часа у воды и до нескольких минут у спирта).

Мы проводили эксперименты, высвобождая капли на свободную поверхность более горячей жидкости из шприца. По итогам наблюдений за 2700 капель (2 жидкости, 3 марки масла, 3 температуры) вычислено среднее время жизни (левитации) и процент затонувших капель, результаты для воды и спирта приведены на рис. 2 и 3.

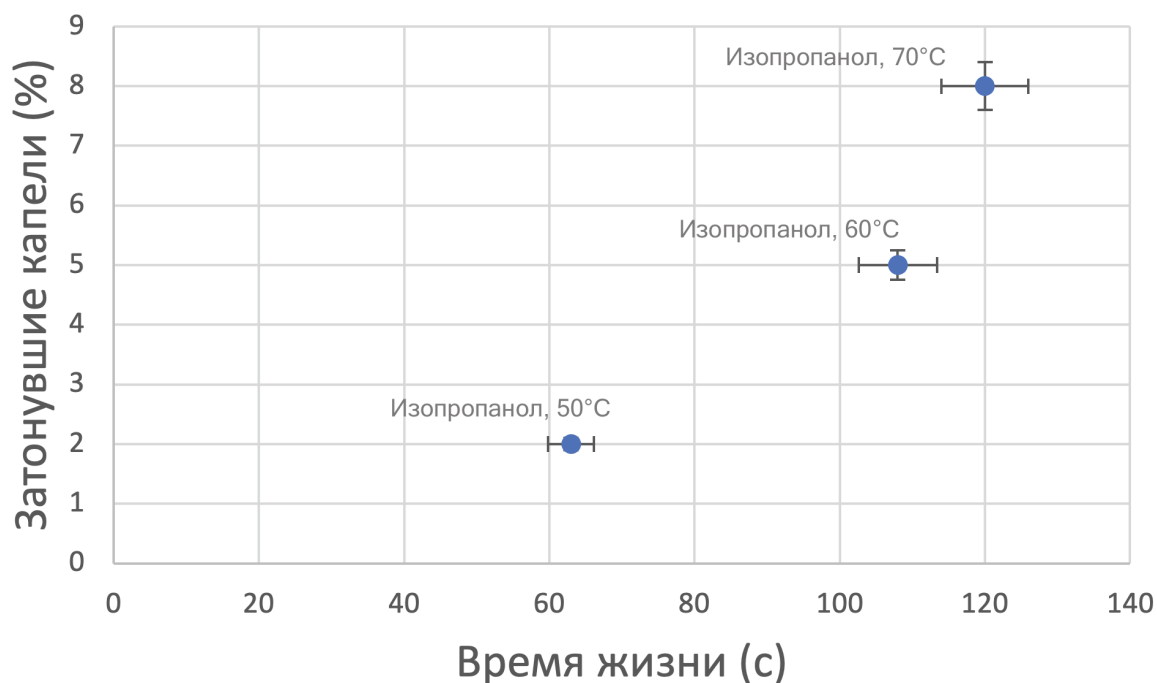


Рис. 2 Время (жизни) левитации и процент затонувших капель спирта над маслом

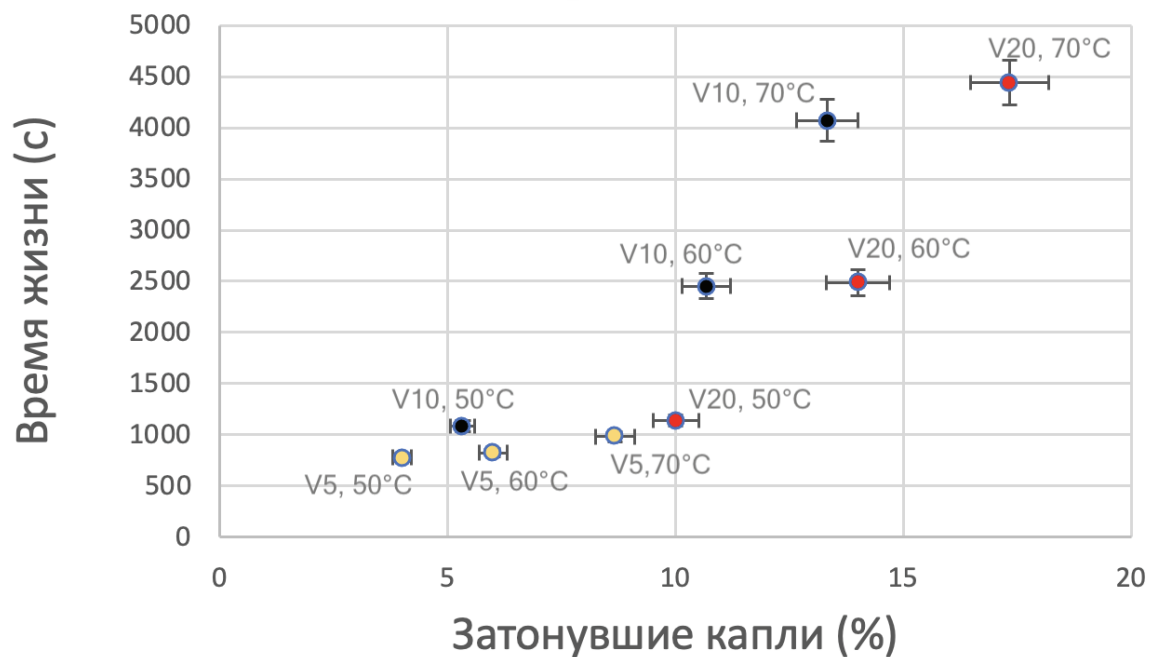


Рис. 3 Время (жизни) левитации и процент затонувших капель воды в зависимости от температуры и марки масла

Левитация невозможна, если нижняя жидкость слишком вязкая или недостаточно нагрета для тепловой конвекции. Если внутри ванны есть конвективный поток, капля воды или спирта может оставаться над поверхностью в течение длительного времени (около 1 минуты для спирта, 10 минут для воды), если тонкая воздушная прослойка разделяет две жидкости. Мы заметили, что капля стремится к области самой холодной части поверхности ванны, куда сходятся конвективные потоки из более теплых областей. Для этого в ванну мы добавили алюминиевую пудру, аналогичные эксперименты описаны в [9], где данный факт установлен с помощью тепловизионной съемки и с помощью такой же визуализации пудрой. На рис. 4 воспроизведены фотографии из работы [9]. В наших экспериментах наблюдалось то же самое, но время левитации было порядка нескольких секунд и фотографию сделать не получилось.

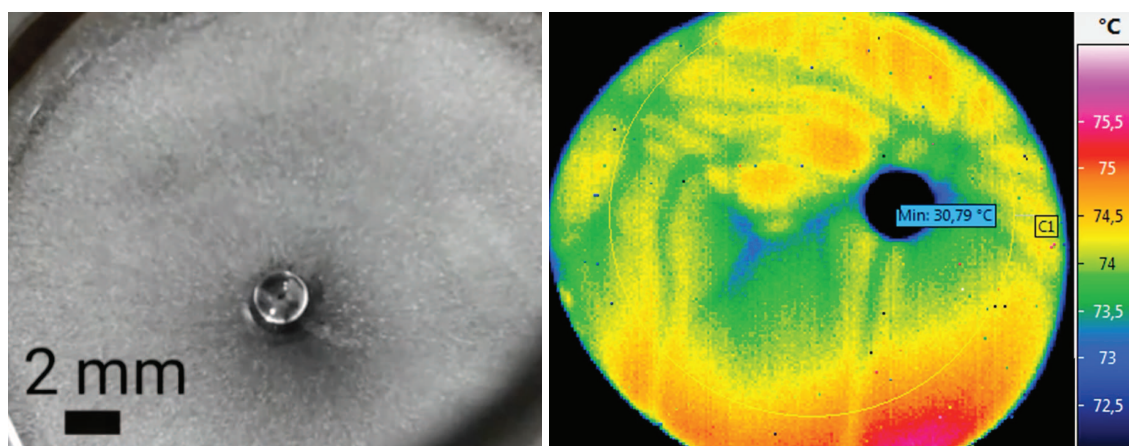


Рис. 4 Визуализация течения алюминиевой пудрой (слева) и с помощью тепловизора (справа) из работы [9]

Испарение капель также имеет решающее значение, ведь капли нелетучих жидкостей (силиконовые масла, глицерин) тонут в течение 10–20 секунд без существенного изменения своего размера. Размер капель воды и спирта постоянно уменьшается (рис. 5).



Рис. 5 Размер капли спирта через 2 секунды и через 50 секунд после начала левитации (слева направо соответственно)

Капля, помещенная на относительно горячую поверхность (выше 70 °С для капель воды), движется по поверхности и обычно тонет прежде, чем станет крошечной. Типичный радиус составляет примерно половину от первоначального и по-прежнему составляет порядка миллиметров. Если поверхность более холодная (около 50 °С), капля достигает крошечного радиуса (на порядок меньше первоначального). В этом случае левитация капель воды длится около часа. Вероятность часовой левитации зависит от вязкости жидкости в ванне: эффект более вероятен с маслом V20, чем с маслом V5. Между тем, повышение вязкости масла увеличивает количество капель, которые тонут сразу после запуска (рис. 2,3). Мы связываем этот эффект с отсутствием стабильности конвективных структур в ванне и запаса устойчивости у левитирующей капли. Для спирта характерна такая же корреляция исходных параметров и зависимость среднего времени (жизни) левитации от температуры нижней жидкости, однако абсолютное значение времени левитации у спирта меньше, чем для воды из-за меньшего значения удельной теплоты парообразования. Полученные данные по времени левитации показывают, что время левитации-случайная величина, которая хорошо описывается нормальным распределением (вероятность выше 96,9%). Дисперсия при этом составляет примерно 10% от математического ожидания. Мы связываем разброс времени левитации при одинаковых внешних условиях с тем, что капля может устанавливаться в разных

точках ванны, поэтому тепловой поток и скорость испарения капли будут несколько различаться от опыта к опыту.

Результаты наблюдений полностью согласуются с моделью, представленной в работе[9]. Капля стремится в более холодную область, чтобы достичь теплового и механического равновесия. Расположение самого холодного места совпадает с точкой застоя жидкости на поверхности ванны, куда сходятся конвективные потоки, образуя единый поток, направленный вниз. Частицы жидкости ванны движутся радиально к центру конвективной ячейки, создавая воздушный поток. Если капля находится в центре, горизонтальная сила не появляется из-за симметрии, в противном случае активный поток притягивает каплю к центру. Итоговое положение становится самым устойчивым для капли.

Левитирующая капля перемещается вдоль границ примыкающих друг к другу ячеек Бернара, так как в этих областях сходятся конвективные потоки, созданные разными источниками. Скорость перемещения капли прямо пропорциональна температуре нижней ванны. Согласно нашим наблюдениям, капли также движутся быстрее на менее вязких поверхностях. Это обусловлено большей скоростью конвективных потоков в менее вязких жидкостях.

Манипуляции положением капли

При помещении капли над слоем масла, налитого в стакан диаметром 6.5 см, положение левитирующей капли оказывается случайным, определяется начальными условиями и случайными факторами, влияющими на мгновенную картину конвективного течения (рис. 7)

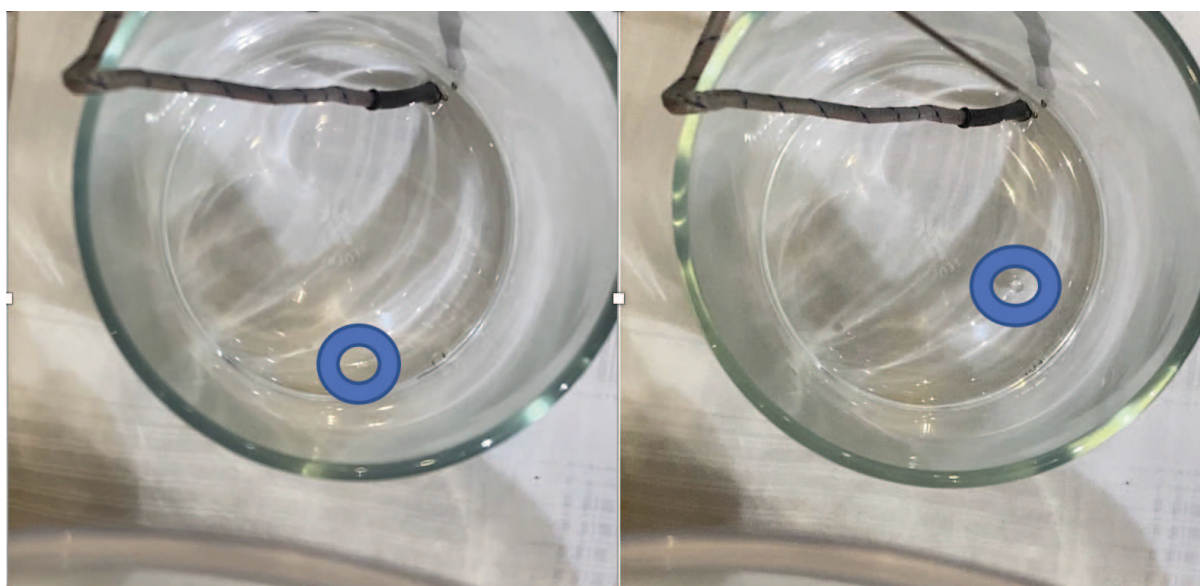


Рис. 7 Положение капли в разных опытах с фиксированными внешними условиями

В экспериментах [9] капля также перемещалась вдоль поверхности масла в процессе левитации, однако с небольшой амплитудой и всегда оставаясь над самым холодным местом. В наших экспериментах наблюдается такое же поведение.

Было протестировано два способа повлиять на распределение конвективных потоков для того, чтобы иметь возможность заранее предсказать положение левитирующей капли:

1. помещение утяжеленного кубика льда для создания нисходящего потока (рис. 8)



рис. 8

2. помещение цилиндра из металлической сетки (хомута) для создания замкнутой конвективной ячейки (рис. 9)

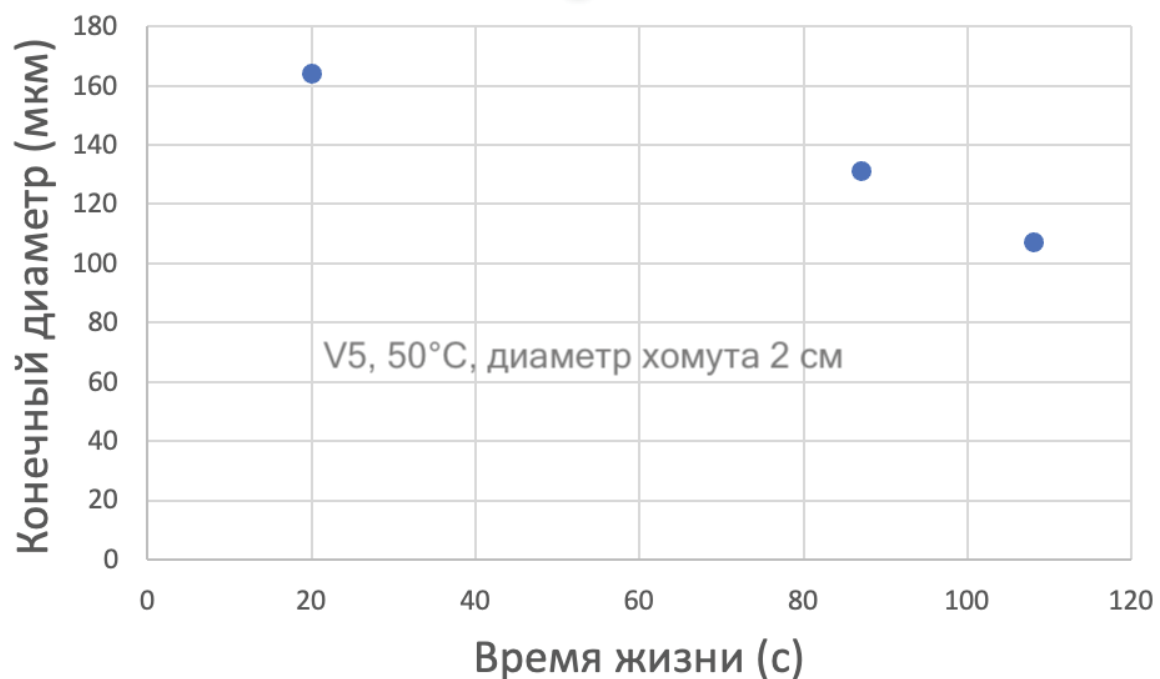


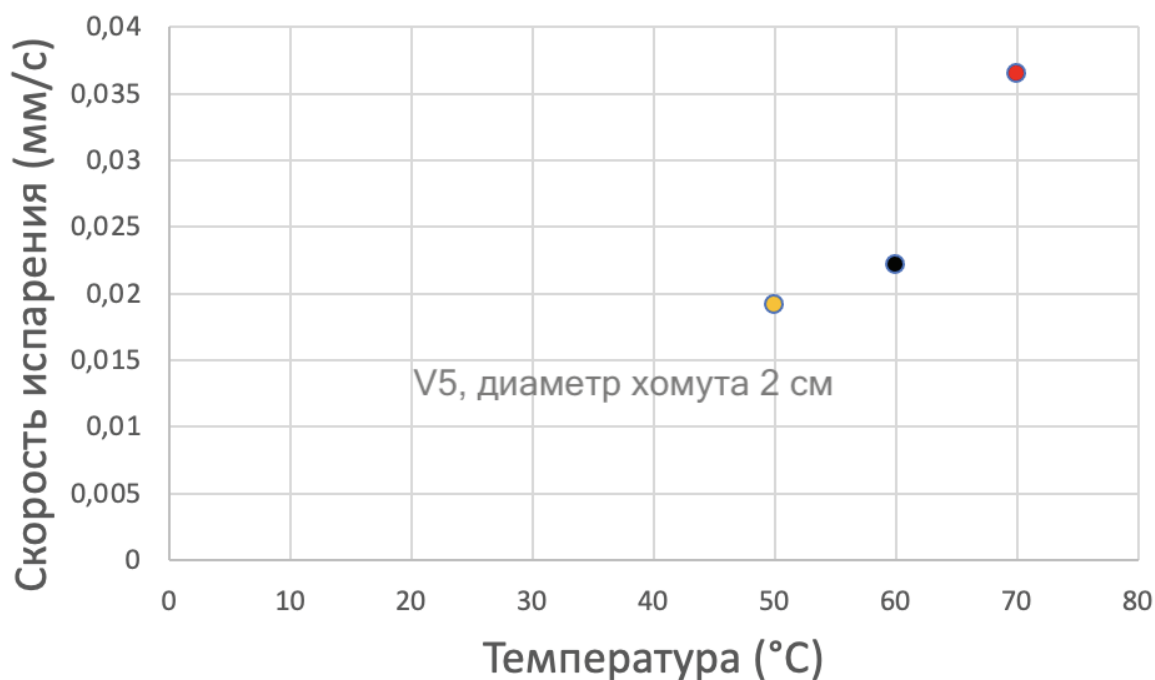
рис. 9

Все эксперименты по манипуляции проводились для капель спирта над маслом V5.

Помещая кубик со льдом на дно нижней ванны так, что он находился ниже границы раздела жидкости нижней ванны и окружающей среды, мы собирались изменить движение конвективных потоков и направить их в сторону более холодной области. В этот момент движение конвективных потоков менялось, однако подвесить каплю не удавалось из-за неоднородности области вокруг кубика льда.

Лед, помещенный на дно сосуда, не оказывал длительного влияния на перемещения конвективных потоков и, следовательно, на движение капли соответственно, только нарушая однородность нижней ванны, когда таял.





Опыты с хомутом оказались более результативными. Мы изучали поведение капли спирта в зависимости от размера хомута, меняя его диаметр от 8 мм до 20 мм. Так как хомут давал дополнительную тепловую энергию из-за нагрева своих боковых стенок, конвективные потоки меняли свое направление, сходясь в центр. При этом положение левитирующей капли оказалось более устойчивым, чем для стакана без хомута. С уменьшением диаметра хомута, увеличивалась продолжительность жизни капли. Мы объяснили такую зависимость увеличением скорости конвективных потоков и частичной изолированностью от внешних сил.

- 1) При уменьшении радиуса верхние слои нижней ванны дополнительно нагреваются, поэтому температура части нижней ванны, заключенной в хомуте, увеличивалась. Следовательно, увеличивалась и скорость конвективных потоков, поднимающих каплю выше над уровнем жидкости. Это положение было более устойчивым, позволяя капле быть дальше от нагретой поверхности и медленнее испаряться.
- 2) Вместе с тем, размеры хомута допускали возможность создания только одной ячейки Бенара, исключая остальные возможные варианты расположения капли, что несомненно позволяло увеличить среднее время левитации.

Таким образом, становится понятно, что при достаточном размере хомута, позволяющем конвективным потокам начать движение и стабильном состоянии нижней ванны (1 конвективная ячейка Бенара) можно создать самое устойчивое положение капли при левитации. При движении хомута с небольшой постоянной

скоростью конвективные ячейки перемещаются вместе с ним, и равновесие капли не нарушается. Используя данный метод можно перемещать каплю в процессе левитации относительно покоящихся в пространстве предметов на существенные расстояния.

Заключение

Мы показали, что в процессе левитации каплю удерживают над поверхностью конвективные потоки, от стабильности и скорости которых зависит время левитации. На продолжительность левитации также влияют характеристики капли и нижней ванны. Капля следует за потоками конвективного течения, которые стремятся в более холодную точку на поверхности. Мы успешно продемонстрировали способ манипуляции устойчивостью и движением капли за счет изменения конвективных потоков. Помещение в ванну хомута диаметром 8 мм позволяет получить наиболее устойчивую конфигурацию, в которой капля спирта начальным радиусом 0.8 мм левитирует в течение 150 с над маслом с температурой 45 С. По сравнению с левитацией над ванной без хомута получено увеличение средней времени левитации в 2,4 раза. Капля всегда находится в одном и том же положении относительно хомута, поэтому его перемещение с помощью внешних устройств позволяет бесконтактно перемещать каплю.

Список литературы

- [1] Goyette, PA., Boulais, É., Normandeau, F. *et al.* Microfluidic multipoles theory and applications. *Nat Commun* 10, 1781 (2019). <https://doi.org/10.1038/s41467-019-09740-7>
- [2] Matsumoto, R., Hasegawa, K. Self-propelled Leidenfrost droplets on a heated glycerol pool. *Sci Rep* 11, 3954 (2021). <https://doi.org/10.1038/s41598-021-83517-1>
- [3] Marzo, A., Seah, S., Drinkwater, B. *et al.* Holographic acoustic elements for manipulation of levitated objects. *Nat Commun* 6, 8661 (2015). <https://doi.org/10.1038/ncomms9661>
- [4] Walker, J. Drops of liquid can be made to float on the liquid. What enables them to do so? *The Amateur Scientist*, *Sci. Am.* 238, 151–158 (1978)
- [5] J. G. Leidenfrost, "On the fixation of water in diverse fire," *Int. J. Heat Mass Transfer* 9, 1153–1166 (1966).
- [6] D. Quéré, "Leidenfrost dynamics," *Annu. Rev. Fluid Mech.* 45, 197–215 (2013)
- [7] A. Duchesne, C. Savaro, L. Lebon, C. Pirat, and L. Limat, "Multiple rotations of a drop rolling inside a horizontal circular hydraulic jump," *Europhys. Lett.* 102, 064001 (2013).
- [8] P. Dell'Aversana, J. R. Banavar, and J. Koplik, "Suppression of coalescence by shear and temperature gradients," *Phys. Fluids* 8, 15–28 (1996).
- [9] E. Mogilevskiy, "Levitation of a non boiling droplet over hot liquid bath", *Physics of Fluids* 32, 012114 (2020) <https://doi.org/10.1063/1.5131818>