

УДК 536.423,536,25

Генератор микрокапель*

**Н.Е. Сибиряков¹, О.А. Кабов¹, И.В. Марчук^{1,2}, В.А. Гришков¹,
И.А. Деревянников¹, Е.Ф. Быковская¹**

¹*Институт теплофизики им С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск*

²*Новосибирский государственный университет*

E-mail: kolyasibir@yandex.ru

Рассматривается устройство, позволяющее получать сильно разреженный поток микрокапель для их последующего использования в различных областях техники или научных исследований. Созданная установка дает возможность получать микрокапли в периодическом режиме. Период колебаний составляет порядка 30 секунд. С помощью пульсаций газового потока отфильтровываются относительно мелкие капли, что дает более однородное по размеру распределение капель.

Ключевые слова: свободная конвекция, испарение, конденсация, микрокапли, автоколебания, левитация капель.

Введение

Процесс левитирующих микрокапель относится к передовой и быстро развивающейся области физики жидкостей. Явление левитации микрокапель изучалось с применением различных механизмов, включая создание самоорганизующихся кластеров и использование специфических физических условий для достижения длительной левитации [1]. В частности, благодаря тому, что отдельные микрокапли могут как притягивать, так и отталкивать друг друга [2], они собираются в больших количествах в кластеры различного типа (шестиугольные, цепочечные, иерархические, кольцевые, мелкие кластеры) в зависимости от условий их формирования и параметров внешней среды [3–6].

Левитирующие микрокапли можно использовать для изучения восходящих потоков пара в области линии контакта газ–жидкость–твердое тело и других слабых газовых потоков вблизи поверхности жидкости [7, 8]. Кроме того, микрокапли, попадая в область сухого пятна, задерживаются там и могут существовать достаточно длительное время [9].

* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-29-00919; <https://rscf.ru/project/23-29-00919>.

Исследователи продемонстрировали левитацию капель миллиметрового размера над лужей силиконовой жидкости в течение длительных периодов времени с помощью соллютокапиллярной конвекции внутри жидкости. Этот метод основан на формировании градиента поверхностного натяжения за счет неравномерного распределения молекул пара из капли на поверхности кюветы, что обеспечивает возможность длительной левитации без внешнего вмешательства [10].

Для поддержания левитации капель применялись различные методы, в том числе создание избыточного давления внутри ультратонкого зазора между каплей и поверхностью жидкости, использование вибраций для имитации прыжков или создание воздушных потоков внутри зазора. Другие методы включают использование эффекта Лейденфроста, магнитной или акустической левитации, которые обычно требуют внешней работы или создания неравновесных условий.

Создание непрерывного контролируемого потока микрокапель представляет особый интерес для применения его в областях микробиологии и биохимии, а также нанотехнологии. Классические методы нанодозирования жидкостей жестко ограничены либо доминирующим поверхностным натяжением, либо необходимостью создания большого набора капель разного размера и тщательного отбора нужных с помощью электрического поля или потока газа [11]. Кроме того, создавая микрокапли с заданными теплофизическими свойствами и наблюдая за их движением и оседанием на поверхностях, можно изучать поведение вирусов и микроорганизмов, передающихся по воздуху [12]. Эти знания могут привести в том числе к разработке инновационных инструментов для изучения микробных сообществ и улучшения нашего понимания экологических и биологических систем.

С этой целью авторы создали экспериментальный стенд, способный генерировать непрерывный поток микрокапель для различных исследовательских целей. Более подробно конструкция и принцип работы устройства для формирования микрокапель жидкости описаны в патенте [13].

1. Экспериментальная установка

Для исследования процесса генерации микрокапель над поверхностью нагретой воды и формирования из них потока, падающего через отверстие в центре испарителя, был изготовлен стенд. Структурная схема его рабочей части представлена на рис. 1.

Для доступа к нижней части генератора микрокапель последний поднимают над устройством позиционирования. В среды 1, 6 и 7 вставляются три термодатчики, еще одна термодатчик (Т4) помещается в середину канала для микрокапель (3). Вода нагревается в верхней кювете стенда до температуры 70–90 °С. По мере подъема водяные пары смешиваются с более холодным окружающим воздухом, и в какой-то момент пар конденсируется в микрокапли. Капли парят над поверхностью жидкости под действием конвекции, потока пара и силы тяжести.

Мениск жидкости понижается к центру кюветы, поэтому со временем капли будут перемещаться к центру кюветы и нырять в канал для микрокапель (3). Для создания нисходящего потока воздуха внутренние стенки канала для микрокапель и нижняя часть установки охлаждаются ниже температуры окружающей среды (вплоть до 5 °С). В итоге ниже экспериментальной установки через центральное отверстие наблюдается непрерывный поток микрокапель (рис. 2). Капли можно собирать, перемещать или иным образом манипулировать ими для различных применений, упомянутых выше.

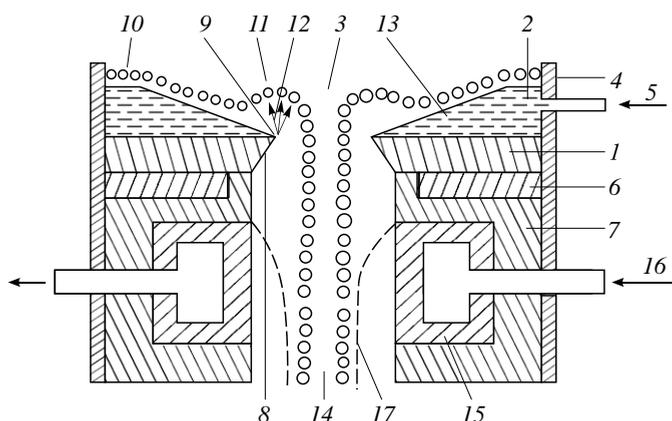


Рис. 1. Схема установки.

- 1 — теплопроводящая подложка, 2 — слой жидкости, 3 — квадратный канал для микрокапель, 4 — ограничительные стенки, 5 — дозатор жидкости, 6 — нагревательный элемент, 7 — тепло- и электроизоляция, 8 — острая кромка, 9 — линия контакта газ – жидкость – твердое тело, 10 — монослой левитирующих микрокапель, 11 — отскакивающие микрокапли, 12 — сверхинтенсивное испарение в области линии контакта, 13 — мениск жидкости, 14 — вертикальное течение микрокапель жидкости, 15 — водоохладитель, 16 — патрубок подачи охлаждающей воды, 17 — конвективный нисходящий поток воздуха.

2. Результаты

В ходе экспериментов было установлено, что установка генерирует сильно разреженный поток микрокапель (рис. 2). Тем не менее выяснилось, что поток пульсирует и периодически часть капель выбрасывается вверх. Анализ особенностей работы установки позволил сделать предположение, что наблюдаемый процесс происходит из-за колебания температур в центральном отверстии. Когда воздух начинает двигаться вниз, в отверстие вместе с каплями попадает горячий водяной пар, который конденсируется и нагревает стенки канала. Нагрев стенок снижает передачу тепла от потока к холодильнику. В результате температура паровоздушной смеси внутри канала повышается, данная смесь приобретает положительную плавучесть, ее скорость падает до 0, а затем меняет направление. В следующий период времени снизу в канал для микрокапель попадает наружный воздух с более низкой температурой и влажностью, воздух в канале остывает и начинает двигаться вниз. В результате возникают автоколебания столба воздуха с низкой частотой. Эти колебания отчетливо видно по движению одиночной капли вблизи центра кюветы, а также по зависимости температуры в канале от времени (T_4) (рис. 3а). Период автоколебаний составляет порядка 30 секунд, однако колебания подвержены случайным флуктуациям (например, понижение температуры происходит в моменты времени 300, 340 и 360 секунд). Преобразование Фурье (рис. 3б) показывает, что основные моды колебаний приходятся на частоты 1/30 и 1/15 Гц, однако в спектре заметны и другие частоты средней интенсивности. Таким образом, установка достаточно длительное время, порядка 25 секунд, генерирует микрокапли. Затем поток быстро



Рис. 2. Микрокапли, вылетающие снизу экспериментальной установки через центральное отверстие.

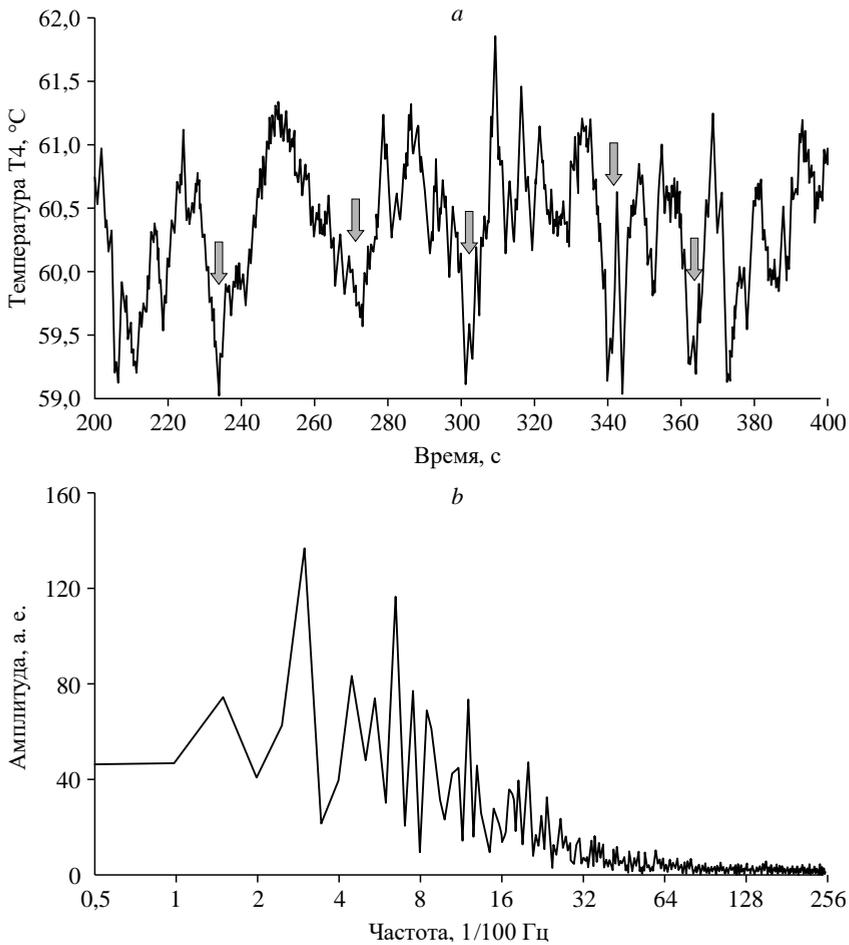


Рис. 3. Колебания температуры столба газа в канале для микрокапель экспериментальной установки (а) и преобразование Фурье показаний термопары от времени (b).
 а: черные стрелки соответствуют быстрому охлаждению;
 б: наличие четко выраженных пиков на частотах 1/30 и 1/15 Гц.

движется вверх в течение 5 секунд и генерация микрокапель прекращается. Пульсации газового потока играют некоторую положительную роль и позволяют отфильтровать относительно мелкие капли и получить более однородное распределение капель по размеру.

Выводы

Показано, что созданная установка генерирует сильно разреженный поток микрокапель. Тем не менее этот поток пульсирует и периодически часть капель выбрасывается вверх, что связано с колебаниями температуры в центральном отверстии. Период автоколебаний не является фиксированной величиной, но в среднем составляет порядка 30 секунд. Перерыв в подаче капель длится около 1/6 периода. Автоколебания позволяют в течение некоторого периода времени получать более равномерный капельный поток за счет выбрасывания вверх сравнительно мелких капель, так как они легче всего уносятся восходящим потоком.

Список литературы

1. **Ajaev V.S., Kabov O.A.** Levitation and self-organization of droplets // Annual Review of Fluid Mechanics. 2021. Vol. 53, No. 1. P. 203–225.
2. **Zaitsev D.V., Kirichenko D.P., Shatekova A.I., Ajaev V.S., Kabov O.A.** Experimental and theoretical studies of ordered arrays of microdroplets levitating over liquid and solid surfaces // Interfacial Phenomena and Heat Transfer. 2018. Vol. 6, No. 3. P. 219–230.
3. **Fedorets A.A., Frenkel M., Legchenkova I., Shcherbakov D.V., Dombrovsky L.A., Nosonovsky M., Bormashenko E.** Self-arranged levitating droplet clusters: a reversible transition from hexagonal to chain structure // Langmuir. 2019. Vol. 35, No. 47. P. 15330–15334.
4. **Fedorets A.A., Dombrovsky L.A., Bormashenko E., Nosonovsky M.** A hierarchical levitating cluster containing transforming small aggregates of water droplets // Microfluidics and Nanofluidics. 2022. Vol. 26, No. 7. Art. 52. 13 p.
5. **Fedorets A.A., Shcherbakov D.V., Dombrovsky L.A., Bormashenko E., Nosonovsky M.** Impact of surfactants on the formation and properties of droplet clusters // Langmuir. 2020. Vol. 36, No. 37. P. 11154–11160.
6. **Fedorets A.A., Bormashenko E., Dombrovsky L.A., Nosonovsky M.** Symmetry of small clusters of levitating water droplets // Physical Chemistry Chemical Physics. 2020. Vol. 22, No. 21. P. 12239–12244.
7. **Kabov O.A., Zaitsev D.V., Kirichenko D.P., Ajaev V.S.** Interaction of levitating microdroplets with moist air flow in the contact line region // Nanoscale and Microscale Thermophysical Eng. 2017. Vol. 21, No. 2. P. 60–69.
8. **Kabov O.A., Zaitsev D.V., Kirichenko D.P., Ajaev V.S.** Investigation of moist air flow near contact line using microdroplets as tracers // Interfacial Phenomena and Heat Transfer. 2016. Vol. 4, No. 2–3. P. 207–216.
9. **Zaitsev D.V., Kirichenko D.P., Ajaev V.S., Kabov O.A.** Levitation and self-organization of liquid microdroplets over dry heated substrates // Physical Review Letters. 2017. Vol. 119, No. 9. P. 094503.
10. **Ivanova N.A., Klyuev D.S.** Self-sustaining levitation of droplets above a liquid pool // Applied Physics Letters. 2023. Vol. 123, No. 3. P. 034103.
11. **Benmore C.J., Weber J.K.R.** Amorphization of molecular liquids of pharmaceutical drugs by acoustic levitation // Physical Review X. 2011. Vol. 1, No. 1. P. 011004.
12. **Kleinstreuer C., Zhang Z.** Airflow and particle transport in the human respiratory system // Annual Review of Fluid Mechanics. 2010. Vol. 42, No. 1. P. 301–334.
13. Пат. 2824439 РФ, МПК⁵¹ B01J 2/02, F28C 3/00. Устройство для формирования потока микрокапель жидкости с возможностью изменения плотности микрокапель / Кабов О.А., Марчук И.В., Быковская Е.Ф.; патентообладатель ИТ им. Кутателадзе СО РАН; № 2023133158; заявл. 14.12.2023; опубл. 07.08.2024, Бюл. № 23.

*Статья поступила в редакцию 13 сентября 2024 г.,
принята к публикации 5 декабря 2024 г.*