

03

## Осаждение и испарение облака бидисперсных капель в нагретом воздухе

© В.А. Архипов, С.А. Басалаев, Н.Н. Золоторёв, К.Г. Перфильева, В.И. Романдин

Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия

E-mail: k.g.perfiljeva@yandex.ru

Поступило в Редакцию 12 июля 2024 г.

В окончательной редакции 4 октября 2024 г.

Принято к публикации 4 октября 2024 г.

Представлены результаты экспериментального исследования динамики осаждения и испарения облака бидисперсных капель в нагретом воздухе. Получена качественная картина осаждения облака. Установлены характеристики его движения и испарения в диапазоне температур 473–633 К. Проведено сравнение с характеристиками осаждения и испарения одиночных капель, размеры которых соответствуют дисперсности входящих в облако капель.

**Ключевые слова:** облако бидисперсных капель, гравитационное осаждение, нагретый воздух, испарение капель, экспериментальное исследование.

DOI: 10.61011/PJTF.2025.03.59817.20057

Изучение характеристик осаждения и испарения облака капель с контролируемыми значениями их размеров и объемной концентрации представляет интерес при проведении экспериментальных исследований взаимодействия капель при столкновениях [1], испарения в высокотемпературной среде [2] и других физических процессов, характеризующих движение газочастиц в среде. Большинство публикаций по характеристикам движения и испарения относится к одиночным каплям, потоку последовательно движущихся капель или облаку полидисперсных капель, образующихся при распыливании жидкости форсунками [3–5]. Результаты экспериментального исследования закономерностей движения и испарения бидисперсного облака капель позволяют детально изучить механизмы отдельных „элементарных“ процессов, оценить адекватность используемых для их описания моделей и в конечном счете повысить достоверность создаваемых физико-математических моделей и компьютерных программ расчета двухфазных течений с деформируемыми частицами дисперсной фазы [1].

В настоящей работе представлены методика и результаты экспериментального исследования закономерностей осаждения и испарения облака бидисперсных капель при свободном падении в нагретом воздухе.

Для экспериментального исследования использовалась установка, включающая устройство для получения облака бидисперсных капель, нагреватель и аппаратуру для визуализации процесса осаждения и измерения массы капель. Устройство для получения капель [6] состоит из двух цилиндрических камер с рабочей жидкостью, разделенных перегородкой. Устройство позволяет формировать два горизонтальных слоя капель с помощью двух наборов капилляров (медицинские инъекционные иглы фирмы Vogt Medical) разного диаметра, равномерно размещенных на нижних крышках камер.

В ходе эксперимента медленно повышали избыточное давление в каждой из камер до значений  $\Delta p_1$ ,  $\Delta p_2$ , обеспечивающих заданное время формирования капель при течении жидкости через капилляры, и обнуляли давление в камерах при образовании устойчивых капель на концах капилляров. Для одновременного отрыва капель каждого слоя от капилляров в камерах создавали импульсы давления.

Для расчета диаметров капилляров, обеспечивающих получение капель заданных диаметров  $D_i$  ( $i = 1, 2$ ), использовалась формула Тэйта [7]:

$$d_i = \frac{\rho g D_i^3}{3.6\sigma}, \quad (1)$$

где  $d_i$  — внутренний (для несмачивающих жидкостей) или внешний (для смачивающих жидкостей) диаметр капилляра;  $\rho$ ,  $\sigma$  — плотность и коэффициент поверхностного натяжения жидкости;  $g$  — ускорение свободного падения.

Для определения значений  $\Delta p_1$  и  $\Delta p_2$  предварительно были проведены расчеты значений массовых секундных расходов, обеспечивающих заданное время образования капель:

$$G_i = \frac{m_i}{t_i}, \quad (2)$$

где  $m_i$  — масса капель диаметром  $D_i$ ;  $t_i$  — время образования капли на конце капилляра.

Величина  $t_i = 50$  s выбиралась из условия отсутствия возмущающих воздействий на каплю при ее медленном образовании из поступающей через капилляр жидкости. По рекомендации [7] при значениях времени образования  $t_i \sim 1$  min отклонение измеренного диаметра образующейся капли от рассчитанного по формуле Тэйта не превышает 0.5%.

Объемный секундный расход жидкости  $Q$  через капилляр определяется формулой Пуазейля [8]:

$$Q = \frac{\pi r^4 \Delta p}{8\mu l}, \quad (3)$$

где  $r$  — внутренний радиус капилляра,  $\mu$  — коэффициент динамической вязкости жидкости;  $l$  — длина капилляра.

Массовый секундный расход жидкости  $G$  через капилляр определяется формулой

$$G = \rho Q = \rho \frac{\pi r^4 \Delta p}{8\mu l} = \frac{\rho S^2 \Delta p}{8\pi \mu l}, \quad (4)$$

где  $S$  — площадь поперечного сечения канала капилляра.

Из (4) следует соотношение для определения  $\Delta p_i$ :

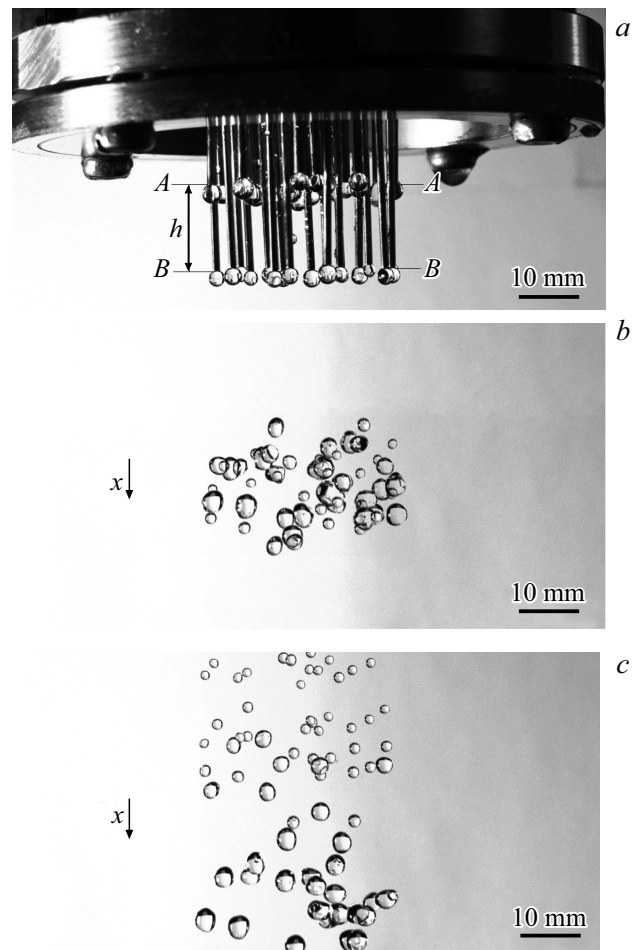
$$\Delta p_i = \frac{8\pi \mu l_i}{\rho S_i^2} G = \frac{8\pi \mu l_i}{\rho S_i^2} \frac{m_i}{t_i}. \quad (5)$$

Значения амплитуды  $P_i \geq 10\Delta p_i$  и длительности  $\Delta t_i = 70$  ms импульсов давления для каждой из камер, обеспечивающие стабильный и одновременный отрыв каждого слоя капель, получены по результатам отлаженных экспериментов.

Для определения закономерностей испарения облака бидисперсных капель в нагретом воздухе использовалась установка, аналогичная описанной в [9]. В области осаждения кластера размещался нагреватель, состоящий из керамической трубы с внутренним диаметром 250 mm и высотой 1 m. На внутренней поверхности нагревателя установлены проволочные нихромовые спирали, соединенные с источником электропитания. Тепловая изоляция обеспечивается за счет покрытия наружной поверхности нагревателя тонколистовой сталью, на входе и выходе из нагревателя установлены асбестовые прокладки. В нижней части установки размещена приемная емкость, установленная на аналитических лабораторных весах марки ВК-150.1 с погрешностью  $\pm 10$  mg.

Аппаратура для визуализации процесса осаждения облака капель и измерения его скорости осаждения включает две скоростные видеокамеры марки MER2-502-79U3C с темпом съемки 450 fps, установленные на разных расстояниях от исследуемой области. Одна из камер регистрировала поле съемки размером  $10 \times 10$  cm, что позволяло оценить размер капель. Другая камера регистрировала исследуемую область осаждения облака капель и использовалась для экспериментального определения скорости осаждения центра масс кластеров монодисперсных капель путем покадровой обработки результатов видеосъемки по программе CorelDRAW с погрешностью  $\sim 4\%$ .

На данной установке проведена серия экспериментов по исследованию динамики осаждения и испарения кластера бидисперсных капель дистиллированной воды. Для получения капель контролируемых размеров

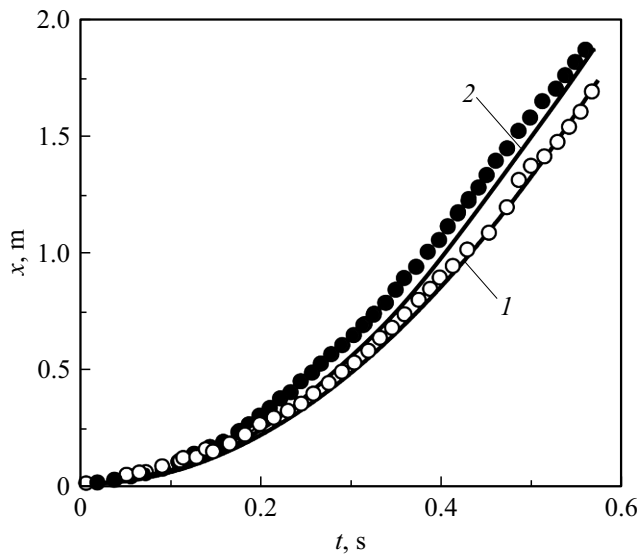


**Рис. 1.** Качественная картина образования и гравитационного осаждения бидисперсного облака капель (20 капель диаметром 3.7 mm и 20 капель диаметром 2.9 mm). *a* — образование двух слоев капель в плоскостях *A–A* и *B–B* ( $x \approx 0$  cm); *b* — движение бидисперсного облака капель ( $x \approx 1.5$  cm); *c* — расслоение бидисперсного облака на два монодисперсных кластера ( $x \approx 5.0$  cm).

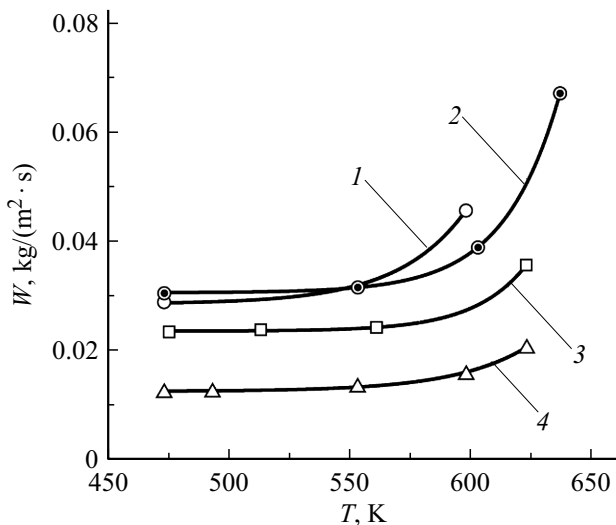
$D_1 = 2.9$  mm,  $D_2 = 3.7$  mm использовались медицинские инъекционные иглы калибра 21G и 16G соответственно.

Для сравнительного анализа были проведены исследования динамики осаждения и характеристик испарения одиночных капель, диаметры которых соответствовали исследуемому бидисперсному облаку. Размеры и характеристики испарения одиночных капель определялись экспериментально по результатам измерения массы 200–300 идентичных капель, прошедших через нагреватель с заданной температурой. Скорость одиночных капель и зависимость пройденного расстояния от времени определялись численным решением уравнения осаждения капли [9].

На рис. 1 представлена качественная картина образования и гравитационного осаждения бидисперсного облака капель на разных расстояниях  $x$  от плоскости нижнего слоя капель (плоскость *B–B* на рис. 1). Из



**Рис. 2.** Зависимости пройденного расстояния от времени. 1, 2 — рассчитанные зависимости  $x(t)$  для одиночных капель диаметром 2.9 и 3.7 mm соответственно. Светлые кружки — измеренные значения для центра масс кластера монодисперсных капель диаметром 2.9 mm, темные кружки — измеренные значения для центра масс кластера монодисперсных капель диаметром 3.7 mm.



**Рис. 3.** Экспериментальные зависимости скорости испарения капель от температуры воздуха в нагревателе. 1 — одиночная капля диаметром 2.9 mm, 2 — одиночная капля диаметром 3.7 mm, 3 — бидисперсное облако (20 капель диаметром 3.7 mm и 20 капель диаметром 2.9 mm), 4 — монодисперсный кластер (40 капель диаметром 2.9 mm).

рис. 1 следует, что в начальный момент времени образуются два слоя монодисперсных капель в плоскостях А–А и В–В (рис. 1, а). После отрыва капель от капилляров на расстоянии  $x \approx 1.5$  см происходит формирование облака бидисперсных капель (рис. 1, б), которое на расстоянии  $x \approx 5.0$  см начинает расслаиваться на два

отдельных монодисперсных кластера (рис. 1, с). При разделении облака на два кластера концентрация капель в каждом из них уменьшается, и дальнейшее осаждение каждого из кластеров происходит в режиме „продуваемого“ облака [10] со скоростью одиночной капли, диаметр которой равен диаметру входящих в кластер капель (рис. 2).

Интенсивность испарения капель в облаке оценивалась по скорости испарения  $W$  капель при их прохождении через нагреватель при варьировании средней температуры внутри его полости. Скорость испарения  $W$  рассчитывалась по формулам [9]:

$$W = \rho \frac{\Delta R}{t}, \Delta R = R_0 - R_k = R_0 \left[ 1 - \sqrt[3]{1 - \Delta m} \right],$$

$$\Delta m = \frac{m_0 - m_k}{m_0},$$

где  $\Delta R$  — уменьшение радиуса капли от  $R_0$  до  $R_k$  за счет испарения;  $m_0$ ,  $m_k$  — масса капли до и после нагревателя;  $\Delta m$  — относительное изменение массы капли в процессе испарения.

Для бидисперсного кластера в качестве  $R_0$  использовалось значение радиуса эквивалентной капли  $R_e = \sqrt[3]{0.5(R_1^3 + R_2^3)}$ . Время прохождения через нагреватель длиной 1 м определялось в соответствии с графиками (рис. 2).

На рис. 3 представлена зависимость скорости испарения одиночных капель, моно- и бидисперсного кластеров от температуры воздуха в нагревателе. Количественные данные по скорости испарения одиночных капель и ее зависимость от температуры согласуются с результатами исследований [11,12], которые проводились в аналогичных условиях. Из рис. 3 следует, что скорости испарения одиночных капель диаметром 2.9 и 3.7 mm различаются незначительно в диапазоне температур 475–600 К. Интенсивность испарения кластера монодисперсных капель существенно меньше, чем для одиночной капли. Данный эффект наблюдался также в работе [4] и связан, по-видимому, с наличием прослойки из водяных паров между каплями в кластере. Для бидисперсного облака капель эффект влияния паров на скорость испарения менее выражен (рис. 3), чем для монодисперсного кластера. Рассчитанные по результатам прямых измерений  $\Delta m$  более высокие значения скорости испарения бидисперсного кластера (линия 3 на рис. 3) по сравнению со скоростью испарения монодисперсного кластера (линия 4 на рис. 3) могут быть связаны с процессами столкновения капель разных размеров во время осаждения, их коагуляцией, дроблением и образованием вторичных капель [1]. Эти процессы могут влиять как на скорость осаждения образующихся полидисперсных капель, так и на скорость их испарения.

## Финансирование работы

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-19-00307 (<https://rscf.ru/project/22-19-00307/>).

## Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

## Список литературы

- [1] А.А. Шрайбер, Итоги науки и техники. Комплексные и специальные разделы механики, **3**, 3 (1988).
- [2] В.И. Терехов, М.А. Пахомов, *Тепломассоперенос и гидродинамика в газочапельных потоках* (Изд-во НГТУ, Новосибирск, 2008).
- [3] Р.С. Волков, С.А. Керимбекова, П.А. Стрижак, Письма в ЖТФ, **47** (22), 28 (2021). DOI: 10.21883/PJTF.2021.22.51723.18791 [R.S. Volkov, S.A. Kerimbekova, P.A. Strizhak, Tech. Phys. Lett., **48**, 142 (2022). DOI: 10.1134/S1063785022040137].
- [4] О.В. Высокоморная, Г.В. Кузнецов, П.А. Стрижак, *Испарение и трансформация капель и больших массивов жидкости при движении через высокотемпературные газы* (Изд-во СО РАН, Новосибирск, 2016).
- [5] С.А. Керимбекова, Р.С. Волков, П.А. Стрижак, Письма в ЖТФ, **49** (20), 3 (2023). DOI: 10.61011/PJTF.2023.20.56337.19676 [S.A. Kerimbekova, R.S. Volkov, P.A. Strizhak, Tech. Phys. Lett., **49** (10), 41 (2023). DOI: 10.61011/TPL.2023.10.57056.19676].
- [6] В.А. Архипов, С.А. Басалаев, Н.Н. Золоторёв, В.И. Романдин, С.Н. Поленчук, *Способ получения облака бидисперсных капель*, заявка на патент № 2024111059 (заявл.: 23.04.2024).
- [7] А. Адамсон, *Физическая химия поверхностей* (Мир, М., 1979).
- [8] Л.Г. Лойцянский, *Механика жидкости и газа* (Наука, М., 1973).
- [9] В.А. Архипов, С.А. Басалаев, А.И. Коноваленко, К.Г. Перфильева, Письма в ЖТФ, **46** (12), 40 (2020). DOI: 10.21883/PJTF.2020.12.49527.18300 [V.A. Arkhipov, S.A. Basalaev, A.I. Konovalenko, K.G. Perfil'eva, Tech. Phys. Lett., **46** (6), 610 (2020). DOI: 10.1134/S1063785020060176].
- [10] В.Г. Хоргуани, Х.М. Калов, Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана, **11** (3), 278 (1975).
- [11] В.И. Терехов, В.В. Терехов, Н.Е. Шишкин, К.Ч. Би, Инж.-физ. журн., **83** (5), 829 (2010). [V.I. Terekhov, V.V. Terekhov, N.E. Shishkin, K.Ch. Bi, J. Eng. Phys. Thermophys., **83** (5), 883 (2010). DOI: 10.1007/s10891-010-0410-7].
- [12] Г.В. Кузнецов, П.А. Куйбин, П.А. Стрижак, ТВТ, **53** (2), 264 (2015). DOI: 10.7868/S0040364415020131 [G.V. Kuznetsov, P.A. Kuybin, P.A. Strizhak, High. Temp., **53** (2), 254 (2015). DOI: 10.1134/S0018151X15020133].