

03.1;03.4

**Динамика осаждения кластера монодисперсных капель**

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

Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия

E-mail: tarm@niipmm.tsu.ru

Поступило в Редакцию 18 августа 2023 г.

В окончательной редакции 15 ноября 2023 г.

Принято к публикации 28 ноября 2023 г.

Представлены результаты экспериментального исследования динамики гравитационного осаждения кластера монодисперсных капель в воздушной среде. Предложен новый способ получения компактного кластера монодисперсных капель с регулируемыми значениями их диаметра и начальной концентрации. Определены качественная картина деформации начального сферического кластера в вытянутый сфероид и скорость осаждения его центра масс.

**Ключевые слова:** кластер монодисперсных капель, объемная концентрация, гравитационное осаждение, деформация кластера, скорость осаждения.

DOI: 10.61011/PJTF.2024.05.57179.19709

В природе, а также в различных технических приложениях многие процессы включают генерацию облака жидко-капельного аэрозоля и его эволюцию при гравитационном осаждении. В качестве примеров можно привести образование атмосферных осадков из грозовых облаков, распространение токсичных компонентов гарантийного запаса топлива при отделении отработанных ступеней жидкостных ракет-носителей, аварийный сброс авиационного топлива, слив воды в очаг пожара с борта самолета или вертолета с помощью специальных шлюзовых систем.

Экспериментальные количественные данные по изменению формы и скорости осаждения кластера капель при его гравитационном осаждении необходимы для оценки эффективности разрабатываемых математических моделей соответствующих процессов [1–3].

Одним из основных вопросов при моделировании движения кластера капель является определение граничных значений концентрации частиц, разделяющих режимы осаждения („непродуваемое“, „частично продуваемое“ и „продуваемое“ облако [4]). Опубликованные результаты не позволяют провести однозначную оценку граничных значений концентрации капель в кластере ввиду большого разброса данных разных авторов [4–6].

В настоящей работе рассмотрены методика и результаты исследования влияния начальной объемной концентрации капель на скорость осаждения кластера при свободном падении в атмосфере.

Экспериментальная установка [7], схема которой приведена на рис. 1, *a*, состоит из штатива 1, на котором закреплен подающий сосуд 2 с исследуемой жидкостью. В нижней части сосуда 2 вертикально размещены 60 соосных капилляров 3. Верхняя часть подающего сосуда 2 соединена с электропневмоклапаном 4 и микрокомпрессором 5. Электропневмоклапан 4 соединен с нижней частью емкости с исследуемой жидкостью 6. Верхняя часть емкости с исследуемой жидкостью 6 соединена с баллоном со сжа-

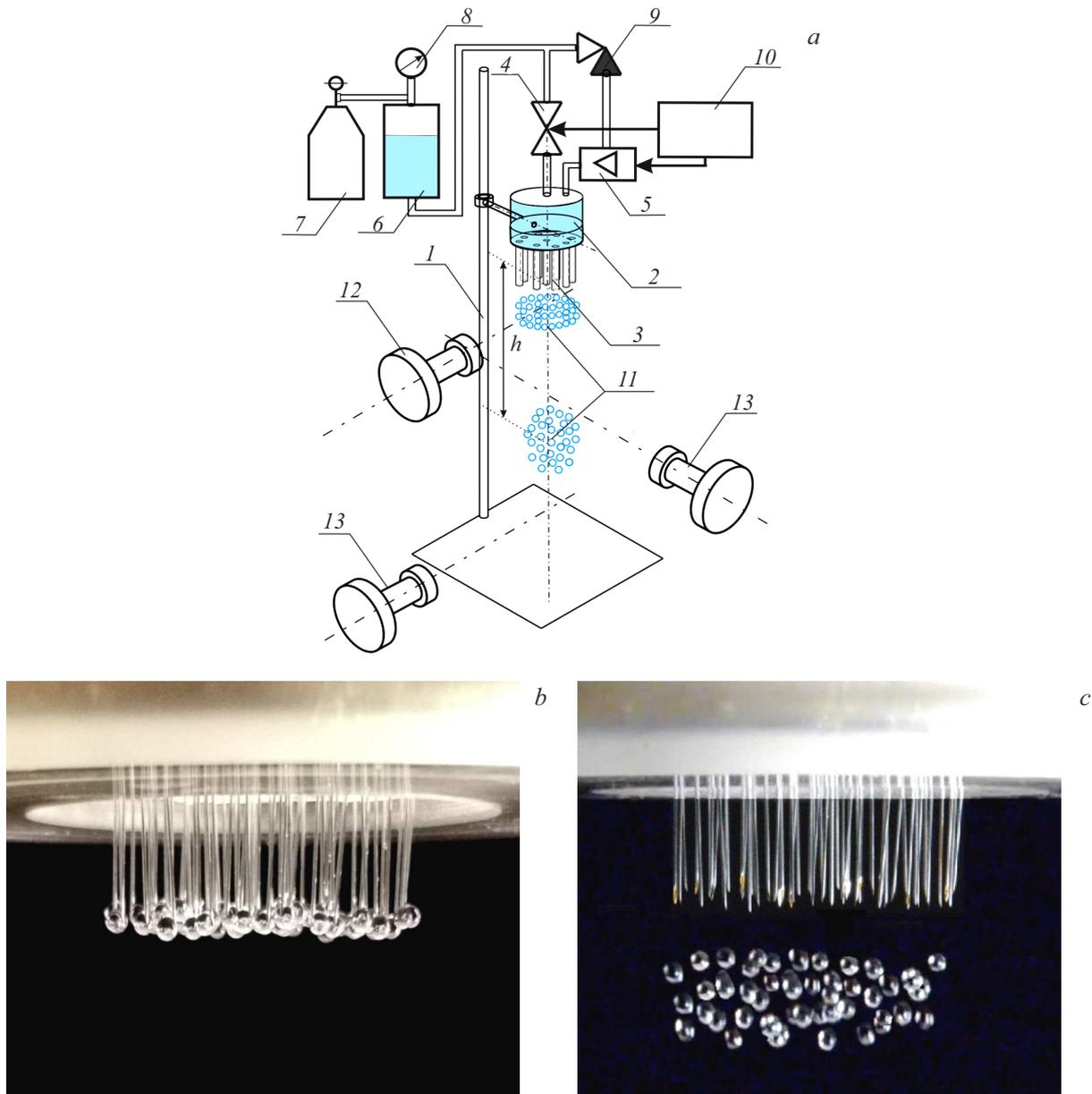
тым воздухом 7. Для контроля давления в емкости 6 используется манометр 8. Микрокомпрессор 5 соединен с системой подачи исследуемой жидкости через обратный клапан 9. Система управления с генератором напряжения 10 обеспечивает программу включения электропневмоклапана 4 и микрокомпрессора 5. Система визуализации кластера капель 11 включает видеокамеру 12 (Nikon D600) для регистрации начального положения сформированного кластера и две камеры машинного зрения 13 (MER2-502-79U3C) для регистрации кластера в процессе его осаждения.

При проведении экспериментов в емкость с исследуемой жидкостью 6 подавался сжатый воздух из баллона 7. При открытом электропневмоклапане 4 исследуемая жидкость поступала в подающий сосуд 2. При этом на концах капилляров 3 формировались устойчивые идентичные капли (рис. 1, *b*). С помощью микрокомпрессора 5 при закрытом электропневмоклапане 4 в сосуде 2 импульсно создавалось давление значением  $p_1$ , соответствующее стабильному отрыву всего кластера капель из капилляров (рис. 1, *c*). Величина давления отрыва капель  $p_1$  определялась экспериментально.

Для варьирования диаметра капель в диапазоне  $D = 1.8–2.6$  мм использовались медицинские иглы разного калибра (21G–30G). Для экспериментального определения размера одиночной капли использовались два способа: видеосъемка осаждающейся капли и способ взвешивания [8]. При использовании способа взвешивания дополнительно на электронных весах устанавливалась приемная емкость (на рис. 1, *a* не показана). Диаметр сферической капли при использовании способа взвешивания рассчитывался по формуле

$$D = \sqrt[3]{6M/(\pi\rho_1N)}, \quad (1)$$

где  $M$  — суммарная масса  $N$  капель, измеренная с помощью взвешивания;  $\rho_1$  — плотность жидкости. Разброс значений диаметра капли, определенного двумя



**Рис. 1.** Схема экспериментальной установки для исследования динамики осаждения монодисперсного кластера капель (а), видеокдры капель, сформированных на концах капилляров (b), и образующегося кластера капель (с).

способами, не превышал 1%. Погрешность определения размеров кластера и скорости осаждения его центра масс не превышала 4%.

Для сравнительного анализа скорости осаждения кластера капель и одиночной капли проводилось численное решение уравнения осаждения капли

$$m \frac{du}{dt} = mg - C_D(\text{Re}) \frac{\pi D^2 \rho u^2}{4} \quad (2)$$

Здесь  $m$  и  $u$  — масса и скорость осаждения капли,  $g$  — ускорение свободного падения,  $\rho$  — плотность воздуха,  $C_D(\text{Re})$  — зависимость коэффициента сопротивления [9,10] от числа Рейнольдса  $\text{Re} = \rho u D / \mu$ , где

$\mu$  — коэффициент динамической вязкости воздуха,

$$C_D(\text{Re}) = \left\{ \begin{array}{ll} \frac{24}{\text{Re}}, & \text{Re} < 0.3 \\ \frac{24}{\text{Re}} (1 + 0.189 \text{Re}^{2/3}), & 0.3 \leq \text{Re} \leq 700 \\ 0.44, & \text{Re} > 700 \end{array} \right\}.$$

Наряду с расчетами были проведены измерения скорости осаждения одиночной капли с помощью визуализации. В экспериментальных исследованиях в качестве изучаемой жидкости использовалась дистиллированная вода. При исследовании влияния концентрации капель на динамику осаждения кластера на часть капилляров надевались заглушки. При этом варьировались количе-

ство капель в кластере и начальное расстояние между их центрами.

Качественная картина эволюции формы монодисперсного кластера капель в процессе его осаждения представлена на рис. 2. Диаметр капель в кластере  $D = 2.3 \text{ mm}$ , а расстояние между соседними капиллярами  $l_0 = 3.4 \text{ mm}$ . Расстояние  $h$ , пройденное кластером, определялось от концов капилляров до его центра масс (рис. 1, *a*). Как следует из рис. 2, в процессе осаждения кластера капель происходит его деформация: плоский слой капель последовательно преобразуется в цилиндр, сферу и далее принимает форму вытянутого сфероида с осями  $a$  и  $b$  (рис. 2). Характерные размеры кластера капель по траектории его движения до расстояния  $h = 1.8 \text{ m}$  изменялись следующим образом. На высоте  $h \approx 0.1 \text{ m}$  формировался сферический кластер диаметром около  $40 \text{ mm}$ . В процессе осаждения характерный размер кластера  $a$  монотонно возрастал от  $40 \text{ mm}$  до стационарного значения  $140 \text{ mm}$ ; далее на расстоянии  $h \approx 1.0 \text{ m}$  наблюдалось дальнейшее увеличение характерного размера  $a$ . Высота кластера  $b$  монотонно возрастала от  $40$  до  $355 \text{ mm}$ .

При этом увеличивался объем кластера; как следствие, увеличивалось среднее расстояние между центрами капель в кластере  $l \geq l_0$ . Для анализа механизма увеличения объема кластера рассмотрим зависимость безразмерного параметра  $k = l/D$  от расстояния  $h$  (рис. 3, *a*). При увеличении объема кластера в процессе его осаждения уменьшается объемная концентрация  $C$  капель в кластере:

$$C = nV/V_c, \tag{3}$$

где  $n$  — количество капель,  $V = \pi D^3/6$  — объем капли,  $V_c = \pi a^2 b/6$  — объем кластера.

Соотношение для определения увеличения среднего расстояния между центрами капель при осаждении кластера можно получить из формулы связи объемной концентрации сферических частиц со средним расстоянием  $l$  между центрами соседних частиц [11]:

$$l = D \sqrt[3]{\pi/6C}. \tag{4}$$

Отметим, что характер изменения в процессе осаждения характерного размера  $a$  кластера аналогичен зависимости изменения параметра  $k$  от  $h$  (рис. 3, *a*). Такой характер зависимости  $k(h)$  связан, по-видимому, с динамикой изменения расстояния  $l$  между центрами капель и соответственно с изменением объемной концентрации капель, зависящей от объема кластера. Поскольку кластер имеет вид вытянутого сфероида, его объем пропорционален квадрату длины горизонтальной оси (характерного размера  $a$ ), и ее изменение в процессе осаждения оказывает существенное влияние на объем кластера. Данный эффект может быть связан с преобладающим влиянием скорости осаждающегося кластера на площадь его миделева сечения  $S_m = \pi a^2/4$ .

На рис. 3, *b* представлены зависимости скорости осаждения  $u(h)$  кластера капель ( $D = 2.3 \text{ mm}$ ) при различных значениях параметра  $k$ , а также рассчитанной по уравнению (2) скорости осаждения одиночной капли того же диаметра.

Как видно из рис. 3, *b*, скорость осаждения центра масс кластера при начальном значении безразмерного параметра  $k = 1.5$  превышает скорость движения одиночной капли (режим „частично продуваемого“ облака). По мере увеличения начального значения параметра  $k$

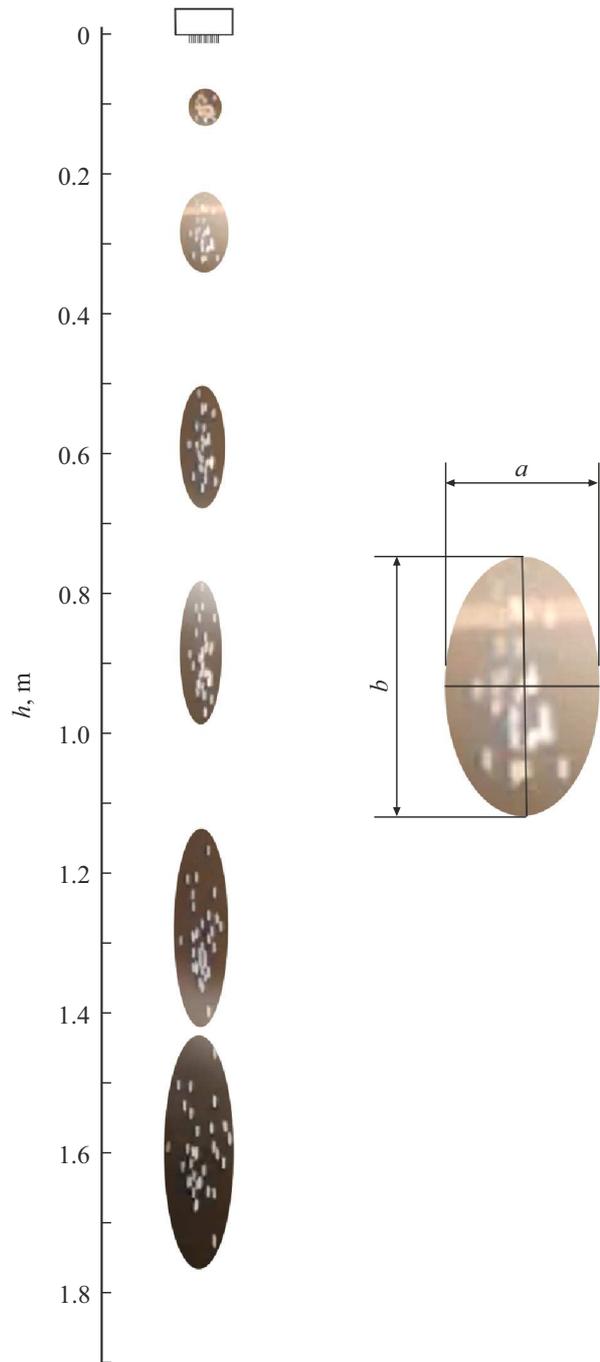
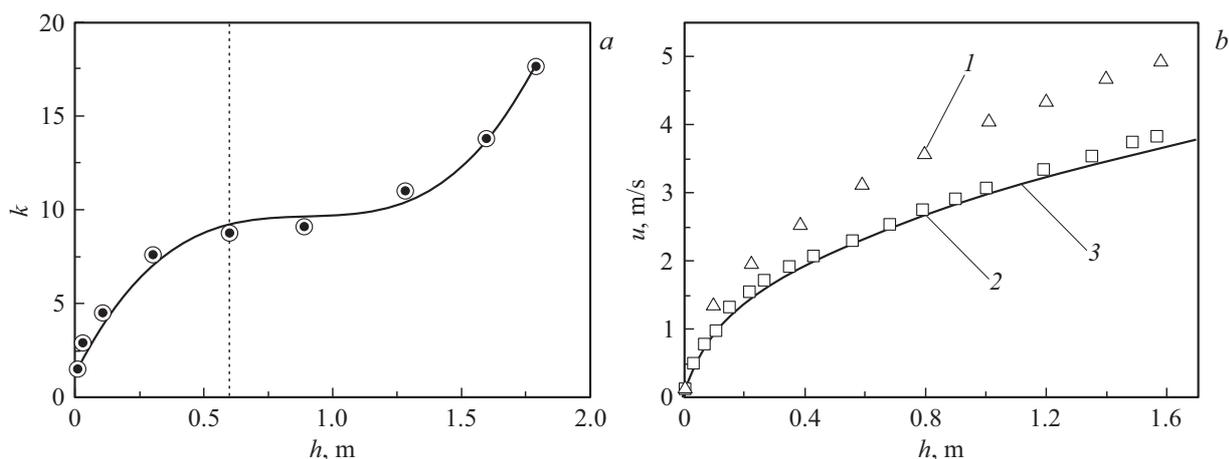


Рис. 2. Видеоряд процесса гравитационного осаждения монодисперсного кластера капель ( $D = 2.3 \text{ mm}$ ).



**Рис. 3.** Зависимость параметра  $k$  (а) и скорости осаждения (б) от пройденного расстояния. 1 — скорость центра масс кластера ( $k = 1.5$ ), 2 — скорость центра масс кластера ( $k = 3.0$ ), 3 — скорость осаждения одиночной капли ( $D = 2.3$  mm).

скорость движения центра масс кластера уменьшается и при значении  $k = 3.0$  практически совпадает со скоростью движения одиночной капли (режим „продуваемого“ облака). Рассчитанные значения среднего расстояния между центрами капель и их начальной объемной концентрации  $C_0$  при  $k = 1.5$  составляют  $l = l_0 = 3.4$  mm,  $C_0 = 0.23$ , а при  $k = 3.0$  —  $l = 6.6$  mm,  $C_0 = 0.13$ . Необходимо отметить, что начальная концентрация капель  $C_0$  рассчитывалась для плоского слоя капель, сформированных на концах капилляров. При отрыве капель и формировании кластера концентрация капель в нем резко снижается на расстоянии  $h = 5$  cm, затем происходит плавное монотонное снижение концентрации капель.

Таким образом, по результатам экспериментального исследования определена качественная картина деформации компактного кластера монодисперсных капель в процессе гравитационного осаждения. Определена зависимость скорости осаждения центра масс кластера от начальной концентрации капель. Показано, что при снижении концентрации капель в кластере зависимость скорости осаждения его центра масс от пройденного расстояния приближается к соответствующей зависимости для одиночной капли.

### 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] В.А. Архипов, С.А. Басалаев, О.В. Матвиенко, К.Г. Перфильева, А.С. Усанина, *Генерация и эволюция жидко-*

*капельного аэрозольного облака в поле силы тяжести* (Изд-во Томск. ун-та, Томск, 2022).

- [2] 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).
- [3] В.И. Терехов, М.А. Пахомов, *Тепломассоперенос и гидродинамика в газокпельных потоках* (Изд-во НГТУ, Новосибирск, 2008).
- [4] В.Г. Хоргуани, Х.М. Калов, Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана, **11** (3), 278 (1975).
- [5] С. Соу, *Гидродинамика многофазных систем* (Мир, М., 1971).
- [6] И.М. Васенин, Н.Н. Дьяченко, К.Е. Елкин, Р.К. Нариманов, *Прикладная механика и техническая физика*, **45** (6), 19 (2004). <https://www.sibran.ru/upload/iblock/7c0/7c09bbcc6d94859e52106bd81846a.pdf> [I.M. Vasenin, N.N. D'yachenko, K.E. Elkin, R.K. Narimanov, *J. Appl. Mech. Tech. Phys.*, **45** (6), 788 (2004). DOI: 10.1023/B:JAMT.0000046025.09468.9a].
- [7] В.А. Архипов, С.А. Басалаев, Н.Н. Золоторев, С.Н. Поленчук, В.И. Романдин, К.Г. Перфильева, А.С. Усанина, *Способ получения компактного кластера монодисперсных капель заданного размера*, патент РФ № 2795373, МПК G01F 11/00 (опубл. 03.05.2023). <https://www1.fips.ru/ofpstorage/Doc/IZPM/RUNWC1/000/000/002/795/373/%D0%98%D0%97-02795373-00001/document.pdf>
- [8] 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. Basalacv, A.I. Konovalenko, K.G. Perfil'eva, *Tech. Phys. Lett.*, **46** (6), 610 (2020). DOI: 10.1134/S1063785020060176].
- [9] Р.И. Нигматулин, *Динамика многофазных сред* (Наука, М., 1987), ч. 1.
- [10] Г.И. Келбалиев, *Теоретические основы хим. технологии*, **45** (3), 264 (2011). [G.I. Kelbaliyev, *Theor Found Chem. Eng.*, **45** (3), 248 (2011). DOI: 10.1134/S0040579511020084].
- [11] Дж. Конвей, Н. Слоэн, *Упаковки шаров, решетки и группы* (Мир, М., 1990), т. 1. [J.H. Conway, N.J.A. Sloane, *Sphere packings, lattices and groups* (Springer, N.Y., 1988). DOI: 10.1007/978-1-4757-2016-7].