

Научная статья

УДК 532.522

doi: 10.17223/19988621/86/2

Анализ режимов гравитационного осаждения капли

Владимир Афанасьевич Архипов¹, Сергей Александрович Басалаев²,
Ксения Григорьевна Перфильева³, Владимир Иванович Романдин⁴,
Анна Сергеевна Усанина⁵

^{1, 2, 3, 4, 5} Томский государственный университет, Томск, Россия

¹ leva@niipmm.tsu.ru

² tarm@niipmm.tsu.ru

³ k.g.perfiljeva@yandex.ru

⁴ romandin@niipmm.tsu.ru

⁵ usaninaanna@mail.ru

Аннотация. Проведено численное исследование зависимости скорости осаждения капли воды в воздухе. Показано, что длина нестационарного участка траектории возрастает от 1 до 15 м при увеличении диаметра капель от 0.5 до 5.0 мм. Получена аппроксимационная зависимость для определения расстояния установления стационарного режима. Проведено экспериментальное исследование осаждения капель воды диаметром от 1.92 до 3.66 мм. Показано, что формула Клячко–Мазина для коэффициента сопротивления обеспечивает наиболее близкое соответствие расчетных и экспериментальных данных по скорости осаждения.

Ключевые слова: капля, твердая сферическая частица, гравитационное осаждение, режим осаждения, число Рейнольдса, коэффициент сопротивления, расстояние установления стационарного режима осаждения, экспериментальное исследование, численное исследование

Благодарности: Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ в рамках государственного задания № FSWM-2020-0036.

Для цитирования: Архипов В.А., Басалаев С.А., Перфильева К.Г., Романдин В.И., Усанина А.С. Анализ режимов гравитационного осаждения капли // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. 2023. № 86. С. 21–34. doi: 10.17223/19988621/86/2

Original article

Analysis of gravitational settling regimes for a drop

Vladimir A. Arkhipov¹, Sergey A. Basalaev², Kseniya G. Perfiljeva³,
Vladimir I. Romandin⁴, Anna S. Usanina⁵

^{1, 2, 3, 4, 5} Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation

¹ leva@niipmm.tsu.ru

² tarm@niipmm.tsu.ru

³ k.g.perfiljeva@yandex.ru

⁴ romandin@niipmm.tsu.ru

⁵ usaninaanna@mail.ru

Abstract. The results of a study on the gravitational settling of water drops with a diameter of 0.5 – 5 mm in air are presented. A new setup for studying the characteristics of drop setting is tested. To obtain reproducible drops and to measure their sizes, the Mariotte bottle and gravimetric method are presented as the most appropriate. For Weber numbers $We < 1.6$, the patterns of drop setting correspond to a solid spherical particle. It is shown that the length of the non-stationary section of the drop trajectory increases linearly from 1 to 15 m with increasing the drop diameter. The approximation dependence for the distance traveled to reach a stationary settling regime is obtained. It is shown that Klyachko–Mazin formula is the most adequate for determining the drag coefficient in the range of Reynolds numbers $Re = 0.3 \div 700$. The numerical calculation results are in quantitative and qualitative agreement with the experimental data.

Keywords: drop, solid spherical particle, gravitational settling, settling regime, Reynolds number, drag coefficient, distance travelled to attain a stationary settling regime, experimental study, numerical study

Acknowledgments: This work was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the framework of state assignment (No. FSWM-2020-0036).

For citation: Arkhipov, V.A., Basalaev, S.A., Perfilieva, K.G., Romandin, V.I., Usanina, A.S. (2023) Analysis of gravitational settling regimes for a drop. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Matematika i mekhanika – Tomsk State University Journal of Mathematics and Mechanics*. 86. pp. 21–34. doi: 10.17223/19988621/86/2

Введение

В целом ряде природных и техногенных процессов важную роль играют закономерности гравитационного осаждения жидко-капельного аэрозольного облака. В качестве примеров можно привести образование атмосферных осадков [1], распространение токсичных компонентов при отделении отработанных ступеней жидкостных ракет-носителей [2], аварийный сброс авиационного топлива [3], авиационные технологии тушения пожаров [4, 5], капельно-дождевую эрозию почвы [6] и т.д.

При исследовании гравитационного осаждения совокупности частиц дисперсной фазы (капель, пузырьков, твердых частиц) необходимо различать режимы «продуваемого облака», «частично продуваемого облака» и «непродуваемого облака» [7]. При движении облака частиц в режиме «непродуваемого облака» внешняя дисперсионная среда полностью обтекает его. В этом случае частицы располагаются достаточно близко относительно друг друга (толщина пограничного слоя дисперсионной среды превышает расстояние между частицами). При осаждении системы частиц увлекается вся среда внутри этой системы и облако частиц движется как единое целое. При этом закономерности движения облака частиц подобны движению равнообъемного шара или тела другой формы. Наряду с поступательным движением облака в нем возникает циркуляция, сохраняющая его форму и размер. Наиболее сложным для исследования является режим «частично

продуваемого облака». В этом случае поток дисперсионной среды частично обтекает систему частиц и частично проходит сквозь нее. При этом возмущения потока за счет взаимодействия с соседними частицами могут вызывать различные вихревые течения, которые будут ускорять или замедлять движение системы частиц. Данный режим аналитически описать сложно. Для его анализа необходимо проводить либо численное моделирование, либо экспериментальное исследование. В режиме «продуваемого облака» расстояние между частицами велико (гидродинамическим взаимодействием между частицами можно пренебречь) и центр масс облака частиц движется со скоростью одиночной частицы из этого облака.

При моделировании режимов гравитационного осаждения жидко-капельного аэрозоля необходима информация о режимах осаждения отдельных одиночных капель, входящих в его состав. Из сравнения скоростей осаждения облака и отдельной капли можно судить о режиме осаждения облака капель.

Скорость осаждения одиночной капли определяется зависимостью коэффициента ее сопротивления от числа Рейнольдса. Обзор применяемых зависимостей для коэффициента сопротивления частиц, в том числе и капель, приведен в [8]. В технологиях авиационного тушения пожаров необходимо учитывать влияние вдува потока массы с поверхности испаряющейся капли и разность температур капли и среды. Эти эффекты рассмотрены в [9].

Цель настоящей статьи – анализ режимов гравитационного осаждения одиночной капли воды в воздухе в зависимости от ее размера и пройденного расстояния. Анализ режимов осаждения проводился путем сравнения результатов численного решения задачи и экспериментальных данных. Проведение данного анализа необходимо для выбора рабочих параметров модельных экспериментальных установок при исследовании динамики осаждения и испарения кластера капель применительно к технологии авиационного тушения пожаров.

Оценка характеристик осаждения капли

Для расчетной оценки характеристик режимов гравитационного осаждения капли использовалось уравнение движения сферической частицы, в частности капли диаметром D , в среде с плотностью ρ под действием силы тяжести [10]

$$m \frac{du}{dt} = \frac{\pi D^3}{6} (\rho_p - \rho) g - C_D S_m \frac{\rho u^2}{2}, \quad (1)$$

где $m = \rho_p \pi D^3 / 6$ – масса капли; ρ_p – плотность материала капли; u – скорость осаждения; t – время; g – ускорение свободного падения; C_D – коэффициент сопротивления; $S_m = \pi D_m^2 / 4$ – площадь миделева сечения капли; D_m – диаметр миделева сечения деформированной капли.

Для определения диаметра миделева сечения капли, деформированной за счет взаимодействия со средой, использовалась зависимость, полученная численным решением задачи обтекания капли вязким потоком [11]:

$$D_m = kD = (1 + 0.027We) D. \quad (2)$$

Число Вебера рассчитывалось по формуле

$$We = \frac{\rho u^2 D}{\sigma},$$

где σ – коэффициент поверхностного натяжения жидкости.

Для твердой сферы $D = D_m$, при этом в зависимости (2) коэффициент $k = 1$.

Пренебрегая силой Архимеда, поскольку при осаждении капли в воздухе $\rho \ll \rho_p$, уравнение (1) можно представить в виде:

$$\frac{du}{dt} = g - Au^2, \quad (3)$$

где

$$A = Bk^2 C_D, \quad B = \frac{3}{4} \cdot \frac{\rho}{\rho_p D} = \text{const}.$$

Стационарная скорость осаждения капли (сила тяжести уравновешивается силой сопротивления) следует из уравнения (3) при $du/dt = 0$:

$$u_0 = \sqrt{g/A}. \quad (4)$$

С учетом (4) уравнение (3) примет вид:

$$\frac{du}{dt} = A(u_0^2 - u^2). \quad (5)$$

Основным параметром, определяющим режим осаждения капли, является коэффициент сопротивления C_D , который зависит от числа Рейнольдса $Re = \rho u D / \mu$ ($\mu = 1.81 \cdot 10^{-5} \text{ Па} \cdot \text{с}$ – коэффициент динамической вязкости воздуха). При обтекании капли потоком различают Стоксовский ($Re < 0.3$), промежуточный ($0.3 \leq Re \leq 700$) и автомодельный ($Re > 700$) режимы. При проведении расчетов использовались следующие зависимости для коэффициента сопротивления [12]:

$$C_D = \begin{cases} \frac{24}{Re}, & Re < 0.3, \\ \frac{24}{Re} (1 + 0.167 Re^{2/3}), & 0.3 \leq Re \leq 700, \\ 0.44, & Re > 700. \end{cases} \quad (6)$$

$$(7)$$

$$(8)$$

Для зависимости $C_D(Re)$ в промежуточном режиме используется целый ряд теоретических и эмпирических формул [8, 13, 14]. В настоящей работе использовалась формула Клячко–Мазина (7).

Численным решением уравнения (5) с начальным условием $u = 0$ при $t = 0$ и с учетом зависимостей (2), (6)–(8) получены закономерности скорости осаждения капель воды диаметром от 0.5 до 5.0 мм в воздухе ($\rho = 1.205 \text{ кг/м}^3$, $\rho_p = 1000 \text{ кг/м}^3$).

Результаты расчетов зависимостей относительных скоростей осаждения u/u_0 , графики которых приведены на рис. 1, показывают, что скорость осаждения монотонно увеличивается от нуля и асимптотически приближается к стационарному режиму u_0 . Цифрами на графиках, приведенных на рис. 1, указаны диаметры капель (мм).

Рассчитанные значения стационарной скорости осаждения капель для исследуемого диапазона их размеров аппроксимировались зависимостью

$$u_0 = 0.51 + 3.73D - 0.33D^2, \quad (9)$$

где $[u] = \text{м/с}$, $[D] = \text{мм}$.

График зависимости (9) приведен на рис. 2.

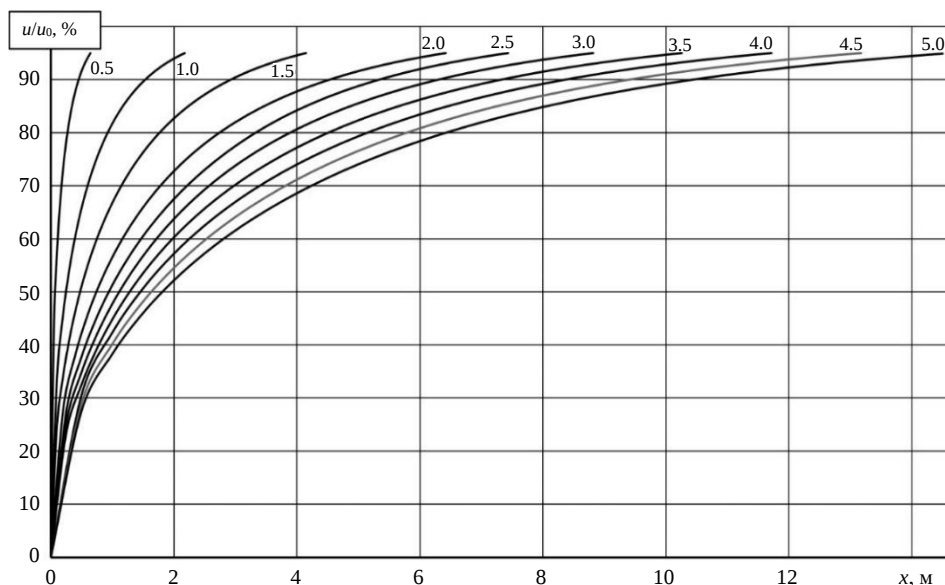


Рис. 1. Зависимости относительной скорости u/u_0 от пройденного каплей расстояния x
Fig. 1. Relative velocity u/u_0 as a function of distance x traveled by a drop

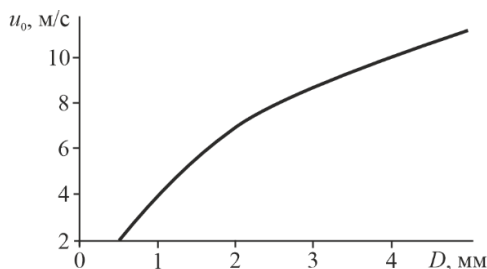


Рис. 2. Зависимость стационарной скорости u_0 от диаметра капли
Fig. 2. Stationary velocity u_0 as a function of the drop diameter

Для оценки параметров экспериментальных установок, обеспечивающих исследование осаждения капель в стационарном режиме, по результатам численных расчетов уравнения движения капли была получена аппроксимационная зависимость пройденного каплей расстояния x от ее диаметра до момента достижения значения скорости, равного $u = 0.95 u_0$:

$$x = 3.07D - 0.51, \quad (10)$$

где $[x] = \text{м}$, $[D] = \text{мм}$.

График зависимости (10) приведен на рис. 3.

Достаточно крупные капли при осаждении быстро переходят в автомоделный режим, для которого $C_D = 0.44 = \text{const}$. При этом уравнение (5) имеет аналитическое решение, которое при $k = 1$ имеет вид:

$$\frac{1}{2u_0} \ln \left| \frac{u_0 + u}{u_0 - u} \right| = At. \quad (11)$$

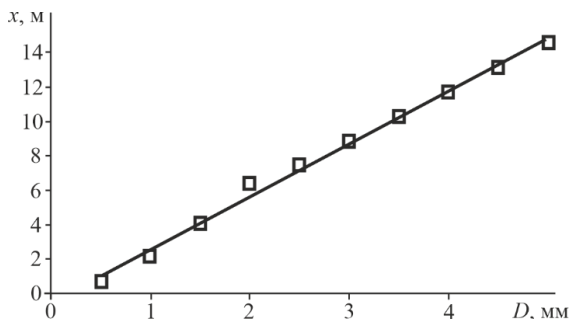


Рис. 3. Зависимость пройденного каплей расстояния от ее диаметра до момента достижения скорости $u = 0.95u_0$

Fig. 3. Dependence of the distance traveled by the drop on its diameter until the velocity $u = 0.95u_0$ is reached

Из (11) следует зависимость скорости капли от времени:

$$u = u_0 \frac{\exp(2u_0 At) - 1}{\exp(2u_0 At) + 1} = u_0 \cdot \text{th}(u_0 At). \quad (12)$$

Время t_* достижения скорости $u = 0.95u_0$, равно

$$t_* = \frac{1}{2Au_0} \ln \left| \frac{u_0 + u}{u_0 - u} \right| = \frac{\ln(1.95/0.05)}{2Au_0} = \frac{\ln 39}{2g} u_0. \quad (13)$$

Расстояние, пройденное каплей до достижения скорости $u = 0.95 u_0$, равно

$$x = \int_0^{t_*} u dt = u_0 \int_0^{t_*} \text{th}(u_0 At) dt = u_0 \ln \left(\frac{\exp(u_0 At_*) + \exp(-u_0 At_*)}{2} \right) t_*. \quad (14)$$

Расчеты по аналитическим зависимостям (12)–(14) хорошо согласуются с результатами численного решения задачи.

Экспериментальное исследование

Для определения размера и скорости осаждения капли разработана экспериментальная установка, схема которой представлена на рис. 4.

Установка включает систему подачи жидкости и систему визуализации процесса. Система подачи воды состоит из сосуда Мариотта 2 с исследуемой жидкостью, жестко закрепленного с помощью крепежных кронштейнов 3 на штативе 1. Сосуд Мариотта 2 выполнен в виде герметично закрытой емкости, в верхней части которой установлена полая, открытая с обоих концов трубка. Один конец трубки погружен в жидкость на определенную глубину h , а другой находится вне емкости и сообщается с атмосферой. Данное устройство позволяет добиться равномерного истечения жидкости благодаря постоянному давлению [15]. Внутренняя полость сосуда Мариотта 2 соединена через запорный вентиль 4 и регулировочный дроссель 5 с инъекционной иглой 6, зафиксированной с помощью крепежа 7 на штативе 1. В нижней части установки размещена приемная емкость 8, установленная на аналитических лабораторных весах 9 марки ВК-150.1 с погрешностью ± 10 мг. Для определения пройденного каплей расстояния в плоскости осаждения расположена масштабная линейка 13 с ценой деления 1 мм.

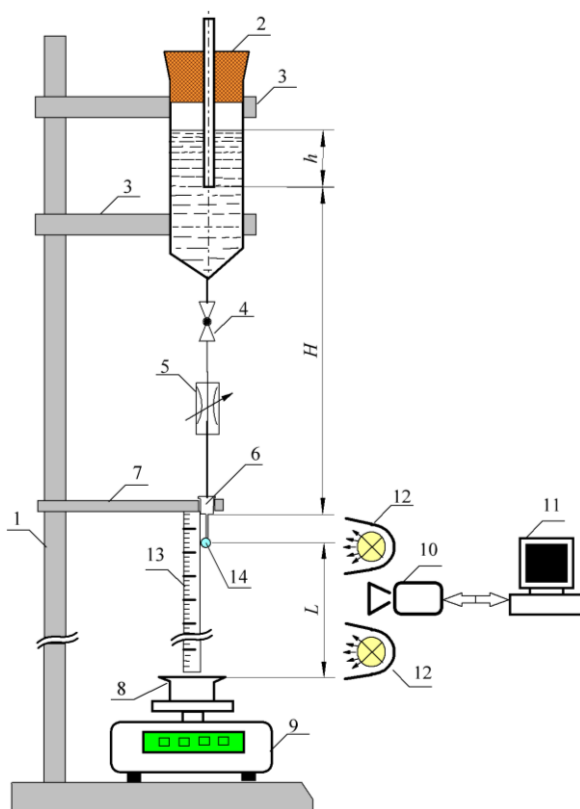


Рис. 4. Схема экспериментальной установки:

1 – штатив; 2 – сосуд Мариотта; 3 – крепежные кронштейны; 4 – запорный вентиль; 5 – регулировочный дроссель; 6 – игла инъекционная; 7 – крепеж; 8 – приемная емкость; 9 – весы; 10 – высокоскоростная видеокамера; 11 – компьютер; 12 – система подсветки; 13 – масштабная линейка; 14 – капля

Fig. 4. Experimental setup design:

(1) support stand; (2) Mariotte bottle; (3) mounting brackets; (4) shut-off valve; (5) adjusting throttle; (6) injection needle; (7) fasteners; (8) receiving container; (9) scales; (10) high-speed video camera; (11) computer; (12) lighting system; (13) scale bar; and (14) drop

Визуализация процесса осаждения капли проводилась скоростной видеокамерой 10 марки MER2-502-79U3C с темпом съемки 450 кадров в секунду, подключенной к компьютеру 11. Система подсветки 12 состояла из стальной пластины с десятью равномерно установленными по длине светодиодными матрицами с напряжением 12 В и мощностью 10 Вт, подключенными к блоку питания.

Особое внимание при проведении эксперимента было уделено снижению погрешности расчетных и экспериментальных данных. В частности, при расчете плотности воздуха, входящей в уравнение движения капли, использовалась формула

$$\rho = 1.205 \cdot \frac{p}{760} \cdot \frac{293}{T},$$

где p – давление воздуха, мм рт. ст.; T – температура окружающей среды, К. Давление и температура воздуха измерялись непосредственно до и после эксперимента с помощью барометра-анероида МД-49-2 с погрешностью ± 0.8 мм рт. ст. и термометра ртутного стеклянного лабораторного с погрешностью $\pm 0.1^\circ\text{C}$ соответственно.

Значение ускорения свободного падения рассчитывалось для реальной географической широты г. Томска ($\varphi \approx 56.5$ град) и составляло $g = 9.78034 + 0.0516403 \cdot \sin^2(\varphi) \approx 9.816$ м/с².

Для уточнения и выбора оптимальной методики нахождения диаметра образующихся капель в кластере проведены работы по определению исходного диаметра D одиночной капли дистиллированной воды. Определение исходного диаметра капли проведено тремя способами. Первый способ основан на законе Тейта [16]. В соответствии с законом Тейта критическим условием отрыва капли от иглы является равенство сил тяжести и поверхностного натяжения, действующих на каплю:

$$mg = z\pi\sigma d_n, \quad (15)$$

где z – корректирующий коэффициент, который зависит от соотношения d_n/D ; $\sigma = 72.5$ мН/м.

Подставляя в (15) формулу для массы сферической капли m , получим формулу для расчета диаметра капли

$$D = \sqrt[3]{\frac{6d_n\sigma z}{\rho_p g}}. \quad (16)$$

Второй способ заключается в определении массы m набора из $N = 100$ капель и расчете диаметра капли по формуле

$$D = \sqrt[3]{\frac{6m}{\pi N \rho_p}}. \quad (17)$$

Третий способ заключается в видеосъемке процесса образования, отрыва капли от иглы и определении диаметра капли по полученным видеокадрам на экспериментальной установке (см. рис. 4). Видеосъемка проведена с помощью скоростной видеокамеры 10 для четырех значений диаметра игл. В качестве примера на рис. 5 приведена фотография капли воды после ее отрыва от иглы с наружным диаметром 0.6 мм.

В таблице представлены результаты определения диаметра одиночной капли дистиллированной воды методом Тейта, взвешиванием и с помощью видеосъемки. Методом Тейта диаметр капли определялся по формуле (16), методом взвешивания по формуле (17). Средние значения диаметра капли при обработке видеок кадров, получены по трем дублирующим опытам.



Рис. 5. Фотография капли дистиллированной воды

Fig. 5. Photograph of a distilled water drop

Результаты определения диаметра одиночной капли

Инъектор	$d_{\text{вн}}, \text{ мм}$	$d_{\text{н}}, \text{ мм}$	$D, \text{ мм}$		
			весовой	видео	Тейта
30 G	0.16	0.31	1.92 ± 0.01	2.2 ± 0.2	2.04
23 G	0.34	0.64	2.61 ± 0.01	2.6 ± 0.3	2.60
21 G	0.51	0.82	2.88 ± 0.01	2.9 ± 0.3	2.82
16 G	1.19	1.65	3.66 ± 0.04	3.7 ± 0.4	3.57

Сравнительный анализ полученных результатов по определению диаметра одиночной капли тремя способами показал, что наиболее точное определение диаметра капль обеспечивает весовой метод (погрешность не более 1%). Существенный разброс результатов измерений диаметра капли методом видеосъемки связан с незначительными колебаниями формы капли в процессе ее гравитационного осаждения. Для повышения точности этого метода необходимо проведение многоракурсной видеосъемки. Метод Тейта может быть рекомендован для оценки размеров капль (расхождение с экспериментом не более 5%).

Проведены экспериментальные исследования по уточнению скорости осаждения одиночной капли на экспериментальной установке (см. рис. 4). Скорость осаждения одиночной капли дистиллированной воды определялась по полученным видеокдрам ее гравитационного осаждения в воздухе на разных расстояниях от места отрыва капли. Данные с видеокамеры 10 обрабатывались в программе CorelDRAW с целью определения расстояния x , пройденного каплей за время t . Полученные данные представлены в виде зависимости $x(t)$ и аппроксимировали степенной функцией (с коэффициентом детерминации $R^2 = 0.99$)

$$x(t) = a \cdot t^b.$$

После дифференцирования $x(t)$ получены значения скорости осаждения капли

$$u = \frac{dx}{dt}.$$

Погрешность определения скорости осаждения капли определялась разрешающей способностью видеокамеры и не превышала $\sim (2 \div 2.5)\%$.

В результате исследования получены экспериментальные и расчетно-теоретические зависимости скорости осаждения от пройденного расстояния для капль дистиллированной воды диаметром 1.92, 2.61, 2.88, 3.66 мм. В качестве типичной зависимости на рис. 6 приведен график $u(x)$ для капли диаметром 3.66 мм. Расчеты проводились для условий проведенных экспериментов (измеренные значения давления и температуры окружающего воздуха). Дополнительно представлены результаты по скорости осаждения одиночного алюминиевого шарика ($D = 3.13 \text{ мм}$, $m = 0.044 \text{ г}$, $\rho_p = 2740 \text{ кг/м}^3$) в зависимости от пройденного расстояния (рис. 7). На рис. 6, 7 цифрами обозначены области режимов осаждения – промежуточного II ($Re \leq 700$) и автомодельного III ($Re > 700$). Из приведенных экспериментальных данных (см. рис. 6, 7) следует, что на исследованном участке осаждения ($x = 1.5 \text{ м}$) капля и алюминиевый шарик движутся в нестационарном режиме (с переменной скоростью осаждения).

Сравнение результатов по скорости осаждения капль показало, что отклонение расчетных и экспериментальных данных для капль диаметром 1.92 и 3.66 мм не превышает погрешности измерений. Из этого следует, что выбранные зависи-

висимости для коэффициента сопротивления (6)–(8) адекватно описывают процесс осаждения каплей в исследованном диапазоне чисел Рейнольдса.

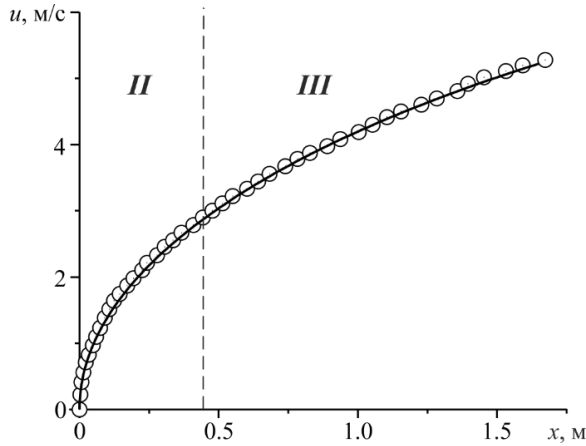


Рис. 6. Численная и экспериментальная (точки) зависимости скорости осаждения капли $D = 3.66$ мм в воздухе
Fig. 6. Numerical and experimental (circles) dependences of the settling velocity of the drop with a diameter of $D = 3.66$ mm in air

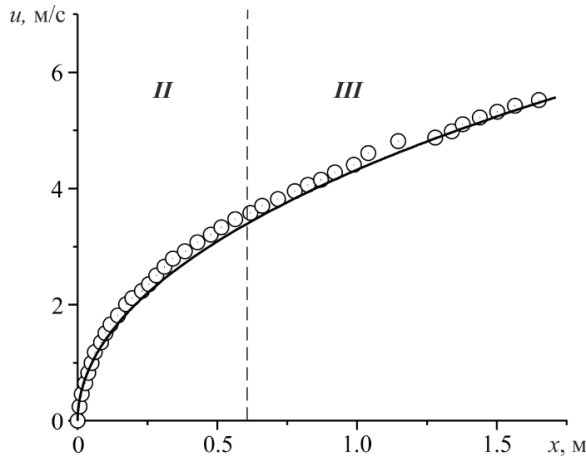


Рис. 7. Численная и экспериментальная (точки) зависимости скорости осаждения алюминиевого шарика в воздухе
Fig. 7. Numerical and experimental (circles) dependences of the settling velocity of an aluminum ball in air

На рис. 8 представлены зависимости числа Рейнольдса от расстояния, пройденного каплями дистиллированной воды и алюминиевым шариком. Цифрами обозначены области режимов осаждения – промежуточного II ($Re \leq 700$) и авто-модельного III ($Re > 700$).

Сравнение зависимостей $u(x)$ для капель и алюминиевого шарика показало, что использованный для расчетов коэффициент сопротивления сферической ча-

стицы полностью отражает динамику осаждения как твердой сферы (шарика), так и капель в диапазоне размеров от 1.92 до 3.66 мм.

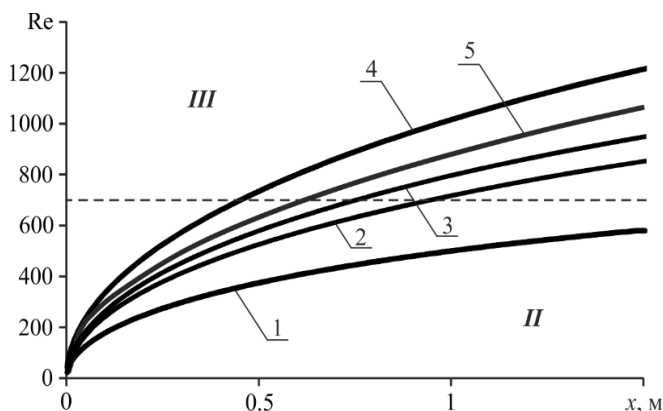


Рис. 8. Зависимости числа Рейнольдса от расстояния, пройденного каплями дистиллированной воды и алюминиевым шариком: 1 – $D = 1.92$ мм, 2 – $D = 2.61$ мм, 3 – $D = 2.88$ мм, 4 – $D = 3.66$ мм, 5 – алюминиевый шарик $D = 3.13$ мм

Fig. 8. The Reynolds number as a function of the distance traveled by distilled water drops and aluminum ball: $D = (1)1.92$, (2) 2.61, (3) 2.88, (4) 3.66, and (5) 3.13 mm (aluminum ball)

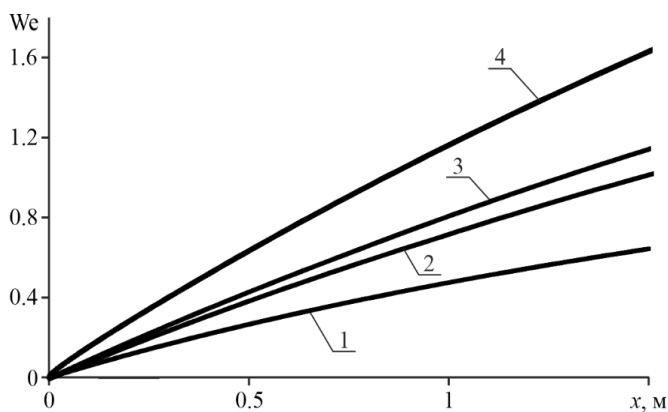


Рис. 9. Зависимости числа Вебера от расстояния, пройденного каплей дистиллированной воды: 1 – $D = 1.92$ мм, 2 – $D = 2.61$ мм, 3 – $D = 2.88$ мм, 4 – $D = 3.66$ мм

Fig. 9. The Weber number as a function of the distance traveled by the distilled water drop: $D = (1)1.92$, (2) 2.61, (3) 2.88, and (4) 3.66 mm

Для оценки влияния возможной деформации капель проведены расчеты зависимости числа Вебера от расстояния, пройденного каплями дистиллированной воды (рис. 9). Из полученных результатов следует, что на расстоянии $x \leq 1.5$ м значение числа Вебера не превышает $We = 1.6$. С учетом формулы (2) максимальное отклонение диаметра миделева сечения капли от ее начального диаметра не превышало 4%.

Заключение

На основе полученных экспериментальных данных и результатов численных расчетов по гравитационному осаждению одиночной капли можно сделать следующие выводы.

1. По результатам численного исследования динамики осаждения одиночной капли воды в воздухе получена аппроксимационная зависимость для расстояния установления стационарного режима осаждения, величина которого линейно возрастает от 1 до 15 м при увеличении диаметра капель от 0.5 до 5 мм.

2. Экспериментально показано, что для получения воспроизводимых капель с контролируемым диаметром наиболее точным является использование сосуда Мариотта для формирования капель и весовой метод для определения их диаметра с погрешностью не более 1%.

3. Показано, что расчетные данные по скорости осаждения капли наиболее близко соответствуют экспериментальным при использовании в расчетах формулы Клячко–Мазина для формулы сопротивления в промежуточном режиме движения капли в диапазоне чисел Рейнольдса от 0.3 до 700.

4. В диапазоне чисел Вебера до 1.6 динамика осаждения капли соответствует динамике осаждения твердой сферы, что объясняется отсутствием значительной деформации капли в исследуемых режимах осаждения.

5. Полученные результаты исследований могут быть использованы при выборе параметров экспериментальных установок для исследования физических процессов в жидко-капельных средах, в частности в процессах испарения капель.

Список источников

1. Карлин Л.Н., Матвеев Л.Т. Об основных факторах образования атмосферных осадков // Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета. 2006. № 2. С. 65–69.
2. Архипов В.А., Жарова И.К., Козлов Е.А., Ткаченко А.С. Прогнозирование экологических последствий распространения облака токсичных аэрозолей в районах падения отработанных ступеней ракет-носителей // Оптика атмосферы и океана. 2015. Т. 28, № 1. С. 89–93.
3. Ткаченко А.С., Жарова И.К., Козлов Е.А. Эволюция облака капель при аварийном сбросе авиационного топлива // Известия вузов. Физика. 2013. Т. 56, № 9/3. С. 210–212.
4. Подрезов Ю.В. Особенности применения и разработки современных авиационных средств борьбы с лесными пожарами // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. 2019. № 2. С. 46–50.
5. Хасанов И.Р., Орлов О.И. Эффективность экранирующей способности распыленной воды при пожаре // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. 2019. № 60. С. 132–140. doi: 10.17223/19988621/60/10
6. Зверьков М.С. Совершенствование способов мониторинга капельно-дождевой эрозии почв в условиях Нечерноземной зоны Российской Федерации : дис. ... канд. техн. наук. М., 2015.
7. Фукс Н.А. Механика аэрозолей. М. : Изд-во АН СССР, 1955.
8. Келбашев Г.И. Коэффициенты сопротивления твердых частиц, капель и пузырей различной формы // Теоретические основы химической технологии. 2011. Т. 45, № 3. С. 264–283.
9. Архипов В.А., Антонникова А.А., Басалаев С.А., Перфильева К.Г. Методы измерения коэффициента сопротивления сферической частицы в нестандартных условиях // Оптика атмосферы и океана. 2019. Т. 32, № 6. С. 495–499. doi: 10.15372/AOO20190613
10. Архипов В.А., Васенин И.М., Шрагер Г.Р., Усанина А.С. Динамическое взаимодействие частиц дисперсной фазы в гетерогенных потоках. Томск : Изд. Дом Том. гос. ун-та, 2019. 330 с.

11. Бутов В.Г., Васенин И.М., Шрагер Г.Р. Деформация капли в вязком потоке и условия существования ее равновесной формы // Прикладная математика и механика. 1982. Т. 46, № 6. С. 1045-1049.
12. Нигматулин Р.И. Динамика многофазных сред. М. : Наука, 1987. Ч. 1.
13. Шилиев М.И., Шилиев А.М. Аэродинамика и тепломассообмен газодисперсных потоков. Томск : Изд-во Том. гос. арх.-строит. ун-та, 2013. 272 с.
14. Терехов В.И., Пахомов М.А. Тепломассоперенос и гидродинамика в газокapельных потоках. Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2008. 284 с.
15. Алешкевич В.А., Деденко Л.Г., Караваев В.А. Механика сплошных сред. М. : Изд-во ФФ МГУ, 1998.
16. Адамсон А. Физическая химия поверхностей. М. : Мир, 1979.

References

1. Karlin L.N., Matveev L.T. (2006) Ob osnovnykh faktorakh obrazovaniya atmosferykh osadkov [On the major factors of atmospheric precipitation formation]. *Uchenye zapiski Rossiyskogo gosudarstvennogo gidrometeorologicheskogo universiteta*. 2. pp. 65–69.
2. Arkhipov V.A., Zharova I.K., Kozlov E.A., Tkachenko A.S. (2015) Prognozirovaniye ekologicheskikh posledstviy rasprostraneniya oblaka toksichnykh aerorozley v rayonakh padeniya otrabotannykh stupeney raket-nositeley [Prediction of ecological consequences of toxic aerosol clouds spreading in the fall areas of waste booster stages]. *Optika atmosfery i okeana – Atmospheric and Oceanic Optics*. 28(1). pp. 89–93.
3. Tkachenko A.S., Zharova I.K., Kozlov E.A. (2013) Evolyutsiya oblaka kapel' pri aviatsionnom sbroze aviatsionnogo topliva [Evolution of a droplet cloud during an emergency jet fuel release]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Fizika – Russian Physics Journal*. 56(9/3). pp. 210–212.
4. Podrezov Yu.V. (2019) Osobennosti primeneniya i razrabotki sovremennykh aviatsionnykh sredstv bor'by s lesnymi pozharemi [Features of the application and development of advanced aircrafts fighting forest fires]. *Problemy bezopasnosti i chrezvychaynykh situatsiy – Safety and Emergencies Problems*. 2. pp. 46–50.
5. Khasanov I.R., Orlov O.I. (2019) Effektivnost' ekraniruyushchey sposobnosti raspylennoy vody pri pozhare [Efficiency of the screening capacity of sprayed water during a fire]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Matematika i mekhanika – Tomsk State University Journal of Mathematics and Mechanics*. 60. pp. 132–140. doi: 10.17223/19988621/60/10
6. Zverkov M.S. (2015) Sovershenstvovaniye sposobov monitoringa kapel'no-dozhdevoy erozii pochv v usloviyakh nechernozemnoy zony Rossiyskoy Federatsii [Improving methods for monitoring rain-drop soil erosion within a non-chernozem belt of the Russian Federation]. Dissertation.
7. Fuks N.A. (1955) *Mekhanika aerorozley* [Mechanics of aerosols]. Moscow: Izdatel'stvo AN SSSR.
8. Kelbaliev G.I. (2011) Koeffitsienty soprotivleniya tverdykh chastits, kapel' i puzyrey razlichnoy formy [Drag coefficients of solid particles, droplets, and bubbles of various shapes]. *Teoreticheskie osnovy khimicheskoy tekhnologii – Theoretical Foundations of Chemical Engineering*. 45(3). pp. 264–283.
9. Arkhipov V.A., Antonnikova A.A., Basalaev S.A., Perfilieva K.G. (2019) Metody izmereniya koeffitsienta soprotivleniya sfericheskoy chastitsy v nestandartnykh usloviyakh [Technique for measurements of the drag coefficient of a spherical particle in nonstandard conditions]. *Optika atmosfery i okeana – Atmospheric and Oceanic Optics*. 32(6). pp. 495–499. doi: 10.15372/AOO20190613
10. Arkhipov V.A., Vasenin I.M., Shragger G.R., Usanina A.S. (2019) *Dinamicheskoye vzaimodeystvie chastits dispersnoy fazy v geterogennykh potokakh* [Dynamic interaction between particles of the dispersed phase in heterogeneous flows]. Tomsk: Izdatel'skiy dom Tomskogo gosudarstvennogo universiteta.

11. Butov V.G., Vasenin I.M., Shrager G.R. (1982) Deformatsiya kapli v vyazkom potoke i usloviya sushchestvovaniya eyo ravновесной формы [Deformation of a drop in a viscous flow and conditions for the existence of its equilibrium shape]. *Prikladnaya Matematika i Mekhanika – Journal of Applied Mathematics and Mechanics*. 46(6). pp. 1045–1049.
12. Nigmatulin R.I. (1990) *Dynamics of Multiphase Medium*. Volume 1. New York: Hemisphere Publishing Corporation.
13. Shilyaev M.I., Shilyaev A.M. (2013) *Aerodinamika i teplomassoobmen gazodispersnykh potokov* [Aerodynamics and heat and mass transfer of gas-dispersed flows]. Tomsk: Izdatel'stvo Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta.
14. Terekhov V.I., Pakhomov M.A. (2008) *Teplomassoperenos i gidrodinamika v gazonkapel'nykh potokakh* [Heat and mass transfer and hydrodynamics in gas-droplet flows]. Novosibirsk: Izdatel'stvo NGTU.
15. Aleshkevich V.A., Dedenko L.G., Karavaev V.A. (1998) *Mekhanika sploshnykh sred* [Continuum mechanics]. Moscow: Izdatel'stvo FF MGU.
16. Adamson A. (1979) *Fizicheskaya khimiya poverkhnostey* [Physical chemistry of surfaces]. Moscow: Mir.

Сведения об авторах:

Архипов Владимир Афанасьевич – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий отделом газовой динамики и физики взрыва Научно-исследовательского института прикладной математики и механики Томского государственного университета (Томск, Россия). E-mail: leva@niipmm.tsu.ru

Басалаев Сергей Александрович – кандидат физико-математических наук, инженер-исследователь Научно-исследовательского института прикладной математики и механики Томского государственного университета (Томск, Россия). E-mail: tarm@niipmm.tsu.ru

Перфильева Ксения Григорьевна – кандидат физико-математических наук, инженер-исследователь Научно-исследовательского института прикладной математики и механики Томского государственного университета (Томск, Россия). E-mail: k.g.perfiljeva@yandex.ru

Романдин Владимир Иванович – научный сотрудник Научно-исследовательского института прикладной математики и механики Томского государственного университета (Томск, Россия). E-mail: romandin@niipmm.tsu.ru

Усанина Анна Сергеевна – кандидат физико-математических наук, инженер-исследователь Научно-исследовательского института прикладной математики и механики Томского государственного университета (Томск, Россия). E-mail: usaninaanna@mail.ru

Information about the authors:

Arkhipov Vladimir A. (Doctor of Physics and Mathematics, Research Institute of Applied Mathematics and Mechanics of Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation). E-mail: leva@niipmm.tsu.ru

Basalaev Sergey A. (Candidate of Physics and Mathematics, Research Institute of Applied Mathematics and Mechanics of Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation). E-mail: tarm@niipmm.tsu.ru

Perfilieva Kseniya G. (Candidate of Physics and Mathematics, Research Institute of Applied Mathematics and Mechanics of Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation). E-mail: k.g.perfiljeva@yandex.ru

Romandin Vladimir I. (Research Institute of Applied Mathematics and Mechanics of Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation). E-mail: romandin@niipmm.tsu.ru

Usanina Anna S. (Candidate of Physics and Mathematics, Research Institute of Applied Mathematics and Mechanics of Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation). E-mail: usaninaanna@mail.ru

Статья поступила в редакцию 16.11.2023; принята к публикации 04.12.2023

The article was submitted 16.11.2023; accepted for publication 04.12.2023