

СТЕНД ДЛЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ДИНАМИКИ ОСАЖДЕНИЯ ОБЛАКА БИДИСПЕРСНЫХ КАПЕЛЬ

© 2025 г. В. А. Архипов^{a,*}, С. А. Басалаев^a, Н. Н. Золоторёв^a,
К. Г. Перфильева^{a,**}, В. И. Романдин^a

^aНациональный исследовательский Томский государственный университет
Россия, 634050, Томск, просп. Ленина, 36

* e-mail: leva@niipmt.tsu.ru

** e-mail: k.g.perfiljeva@yandex.ru

Поступила в редакцию 21.06.2024 г.

После доработки 25.10.2024 г.

Принята к публикации 23.11.2024 г.

Представлены описание экспериментального стенда и примеры его применения для исследования динамики гравитационного осаждения облака бидисперсных капель с заданными значениями их диаметров и начальной концентрации. Основным элементом стенда является оригинальное устройство для получения кластера капель. Показано, что для условий проведенных экспериментов, характеризующихся образованием бидисперсного облака при одновременном отрыве двух горизонтальных слоев монодисперсных капель, на начальном участке осаждения облако движется как единое целое. На некотором расстоянии, зависящем от размеров капель, бидисперсное облако расслаивается на два кластера монодисперсных капель, каждый из которых движется в режиме “продуваемого” облака.

DOI: 10.31857/S0032816225010223, EDN: GHZJUQ

1. ВВЕДЕНИЕ

Стенд предназначен для исследования закономерностей движения бидисперсного облака капель, состоящего из крупнодисперсной и мелкодисперсной фракций, каждая из которых содержит капли одинакового размера. Получение облака или кластера капель с контролируемыми значениями их размеров и объемной концентрации представляет интерес при проведении экспериментальных исследований закономерностей коагуляции и дробления сталкивающихся капель разных размеров [1], скорости испарения капель в высокотемпературной газовой среде [2] и других физических процессов, характеризующих движение гетерогенных сред.

Основной объем публикаций по способам и устройствам получения капель относится к одиночным каплям, потоку последовательно движущихся капель, или облаку полидисперсных капель, образующихся при распыливании жидкости форсунками различных типов [3–5]. Результаты экспериментального исследова-

ния закономерности движения бидисперсного облака капель позволяют более 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 полидисперсных двухфазных течений [1].

В нашей статье рассмотрены экспериментальный стенд и примеры его применения для исследования динамики гравитационного осаждения облака бидисперсных капель с заданными значениями их диаметров и начальной концентрации.

2. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

Схема экспериментального стендад включает устройство для получения облака бидисперсных капель, систему визуализации процесса осаждения капель и электронные весы для определения их размера весовым методом. Основным элементом стендад является оригинальное устройство

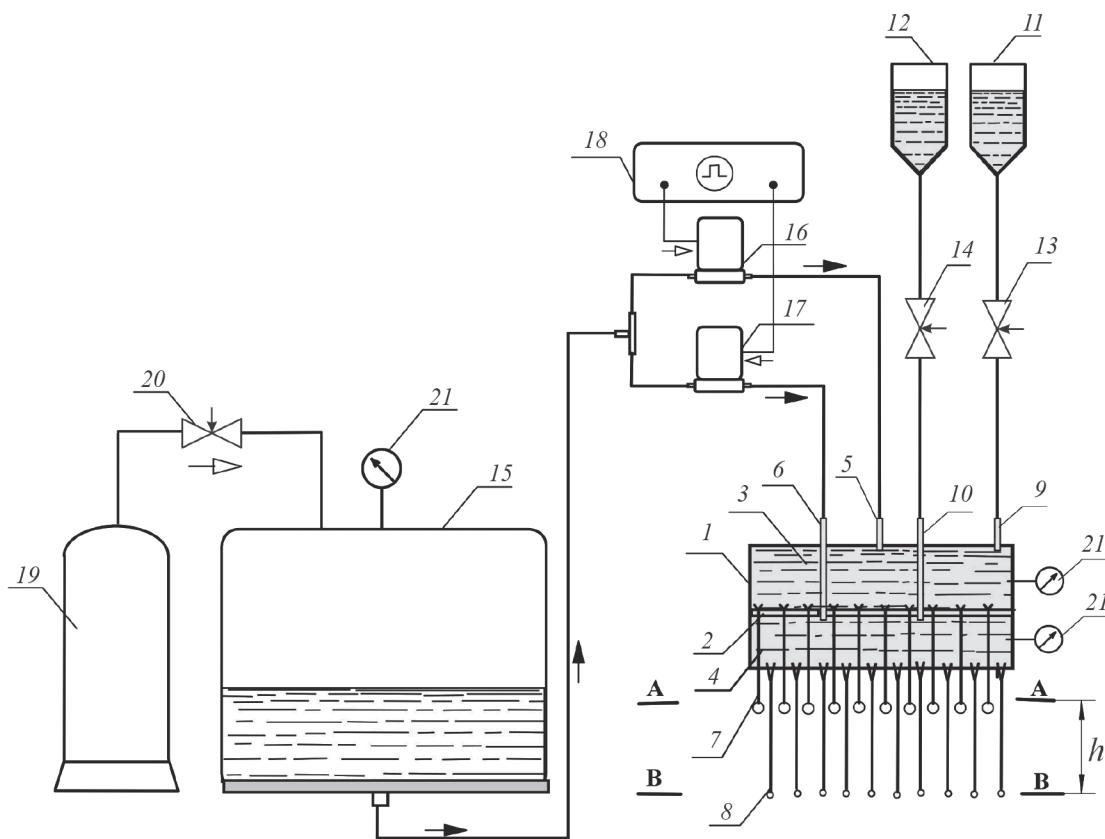


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 – двухкамерный сосуд; 2 – перегородка; 3, 4 – цилиндрические камеры; 5, 6, 9, 10 – патрубки; 7, 8 – капилляры; 11, 12 – открытые сосуды с рабочей жидкостью; 13, 14 – регулировочные вентили; 15 – резервуар; 16, 17 – электропневмоклапаны; 18 – контроллер; 19 – баллон со сжатым воздухом; 20 – редуктор; 21 – манометры.

для получения облака бидисперсных капель [6], схема которого приведена на рис. 1.

Устройство состоит из двухкамерного подающего жидкость сосуда 1 с герметичной перегородкой 2, которая отделяет друг от друга замкнутые цилиндрические камеры 3, 4, расположенные соосно одна над другой. На верхних крышках камер 3, 4 расположены патрубки 5, 6 для заполнения камер жидкостью. На нижних крышках камер 3, 4 размещены наборы капилляров 7, 8, диаметр которых одинаков для каждого из наборов. Диаметр капилляров 7 для верхней камеры 3 больше, чем диаметр капилляров 8 для нижней камеры 4. Капилляры 7 для верхней камеры 3 проходят через нижнюю камеру 4 и загерметизированные отверстия в ее нижней крышке. Верхние крышки камер 3, 4 соединены шлангами через патрубки 9, 10 с сосудами 11, 12, наполненными жидкостью с открытой свободной поверхностью. На соединительных шлангах расположены регулировочные вентили 13, 14. Патрубки 5, 6 камер 3, 4 соединены с резервуаром 15 через электропневмоклапаны (ЭПК) 16,

17, управляемые программируемым контроллером 18. Резервуар 15, заполненный жидкостью, соединен с баллоном 19, содержащим сжатый воздух, через редуктор 20. В резервуаре 17 и камерах 3, 4 установлены манометры 21 для контроля давления.

В качестве капилляров использовались медицинские инъекционные иглы (инъекторы) фирмы Vogt Medical. Каждый из наборов капилляров 7, 8 включал по 20 идентичных инъекторов. Для образования капель использовались тыльные стороны инъекторов с прямым срезом (рис. 2). Среднее расстояние между осями соседних капилляров составляло 7.0 мм.

При проведении серии экспериментов по исследованию динамики осаждения облака капель предварительно удаляли воздух из камер 3, 4 и из наборов капилляров 7, 8 путем вытеснения жидкости из резервуара 15 сжатым воздухом из баллона 19 через редуктор 20. Жидкость подавалась в камеры 3, 4 через патрубки 5, 6 и открытые ЭПК 16, 17. Давление в камерах 3, 4 медленно повышалось за счет подачи в камеры

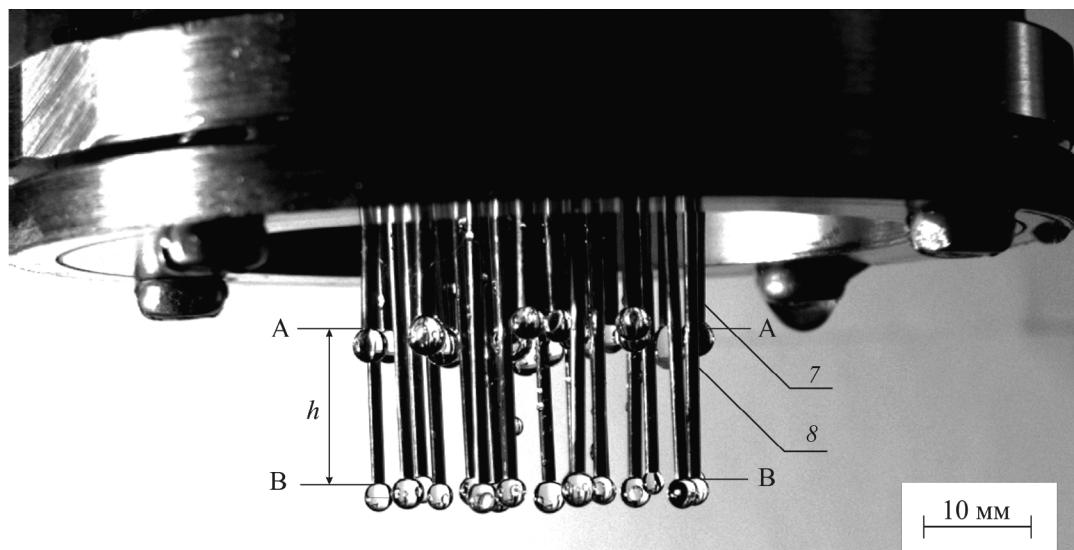


Рис. 2. Фотография исходного облака бидисперсных капель, образованных на концах капилляров.

жидкости из сосудов 11, 12 путем плавного открытия регулировочных вентиляй 13, 14. При достижении заданных значений перепада давления Δp_i ($i = 1, 2$) в каждой из камер добивались заданного времени формирования капель на концах капилляров 7, 8. Перепады давлений в камерах контролировались манометрами 21. При достижении заданного значения времени формирования капель t_0 избыточное давление Δp_i удалялось путем перекрытия вентиляй 13, 14, соединяющих камеры с сосудами 11, 12, имеющими открытую поверхность и, соответственно, действующее на нее атмосферное давление. При этом в каждом из наборов капилляров 7, 8 в горизонтальных плоскостях АА и ВВ формировались слои диаметром d_c устойчиво висящих на концах капилляров монодисперсных капель (рис. 2).

Для образования облака бидисперсных капель при отрыве их от концов капилляров 7, 8 создавались импульсы давления с заданными значениями амплитуды P_i , длительности Δt и задержки времени Δt . Импульсы давления P_i производились за счет подачи жидкости из резервуара 15 через ЭПК 16, 17, заданные параметры работы которых для каждой из камер 3, 4 устанавливались программируемым контроллером 18.

Визуализация процесса осаждения проводилась двумя скоростными видеокамерами марки MER2-502-79U3C с темпом съемки 450 кадров в секунду, установленными на разных расстояниях от исследуемой области. Одна из камер регистрировала поле съемки размером $10 \times 10 \text{ см}^2$, что позволяло оценить размер капель. Вторая камера регистрировала исследуемую область осаждения

облака капель высотой до 2 м и использовалась для определения скорости осаждения центра масс облака капель путем покадровой обработки результатов видеосъемки.

Для определения размера капель использовался весовой метод, основанный на измерении массы M группы из $n = 100\text{--}200$ идентичных капель, осаждающихся в приемную емкость, установленную на аналитических лабораторных весах марки ВК-150.1 с ценой деления 10 мг. Диаметр капли рассчитывался по формуле

$$D = \sqrt[3]{6m/\pi\rho},$$

где $m = M/n$ – масса одиночной капли, ρ – плотность жидкости.

Начальная объемная концентрация капель определялась отдельно для горизонтального слоя АА крупнодисперсных капель и для горизонтального слоя ВВ мелкодисперсных капель (рис. 2) путем расчета суммарного объема $N = 20$ капель, образующих слой, и объема слоя диаметром 32 мм и высотой, равной диаметру образующих этот слой капель.

Для определения диаметра капилляров, обеспечивающих получение облака капель заданного диаметра D , используется формула Тэйта [7], в соответствии с которой критическим условием отрыва капли от капилляра является равенство сил тяжести и поверхностного натяжения, действующих на каплю:

$$mg = k\pi\sigma d, \quad (1)$$

где g – ускорение свободного падения, $k = (0.53\text{--}0.73)$ – коррелирующий коэффициент, учитывающий сужение перешейка при образо-

вании капли из капилляра [7], σ – коэффициент поверхностного натяжения жидкости, d – внутренний (для несмачивающих жидкостей) или наружный (для смачивающих жидкостей) диаметр капилляра.

Подставляя в формулу (1) массу сферической капли $m = \rho\pi D^3/6$, получим формулу для расчета диаметра капилляра, обеспечивающего получение капель заданного диаметра:

$$d = \frac{\rho g D^3}{6k\sigma} = \frac{\rho g D^3}{3.6\sigma}.$$

Диаметр капель в облаке бидисперсных капель можно варьировать путем использования сменных капилляров разного диаметра, а также изменением коэффициента поверхностного натяжения σ за счет введения поверхностно-активного вещества в исследуемую жидкость.

Для определения значений Δp_i предварительно проведем расчет массового секундного расхода жидкости G , обеспечивающего заданное время образования капель t_0 :

$$G = m/t_0, \quad (2)$$

Время образования капель на концах капилляров $t_0 = 50$ с выбиралось из условия отсутствия возмущающих воздействий на каплю при ее медленном образовании при поступлении жидкости из капилляра [7]. При таких значениях времени образования отклонение измеренного диаметра образующейся капли от рассчитанного по формуле Тэйта не превышает 0.5%.

Для капилляров малого диаметра при ламинарном режиме течения объемный секундный расход вязкой жидкости через капилляр определяется формулой Пуазейля [8]

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

где r – внутренний радиус капилляра, Δp – перепад давления на капилляре, μ – коэффициент динамической вязкости жидкости, l – длина капилляра.

Массовый секундный расход определяется формулой

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

Выражая радиус капилляра r через площадь его поперечного сечения $S = \pi r^2$, формулу (3) можно представить в виде

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

Из формулы (4) получается следующее соотношение для определения необходимых значений перепада давления Δp_i ($i = 1, 2$), обеспечивающих получение капель с заданными значениями их массы (или размера) через капилляры с геометрическими характеристиками S_i, l_i :

$$\Delta p_i = \frac{8\pi\mu l_i}{\rho S_i^2} G_i = \frac{8\pi\mu l_i}{\rho S_i^2} \frac{m_i}{t_0}. \quad (5)$$

Соотношения для определения амплитуды $P_i \geq 10\Delta p_i$ и длительности $\Delta t = 70$ мс импульсов давления для каждой из камер получены по результатам экспериментов с варьированием этих величин, они соответствуют условию одновременного стабильного отрыва всех капель в каждом из наборов капилляров.

В лабораторных исследованиях в ряде случаев необходимо рассмотреть взаимодействие и испарение капель в облаке на заданном расстоянии x^* от начала осаждения. Поскольку крупнодисперсная фракция капель опережает мелкодисперсную, для обеспечения образования бидисперсного облака в заданной точке x^* необходимо крупнодисперсные капли сбрасывать с задержкой времени Δt по отношению к мелкодисперсным. Для определения задержки времени Δt рассмотрим динамику осаждения капель разных размеров.

Предварительно определяем зависимости пройденного расстояния x от времени τ для заданных значений диаметров капель D_1 и D_2 :

$$x = f_1(\tau), x = f_2(\tau). \quad (6)$$

Эти зависимости определялись численным решением уравнения гравитационного осаждения одиночной капли с заданными зависимостями коэффициента сопротивления для разных режимов осаждения (стоксовский, промежуточный и автомодельный) [9].

Из соотношений (6) находим обратные функции:

$$\tau = \varphi_1(x) = f_1^{-1}(x), \quad \tau = \varphi_2(x) = f_2^{-1}(x), \quad (7)$$

определяющие зависимость времени осаждения капель с диаметрами D_1, D_2 от пройденного расстояния. В качестве примера рассмотрим осаждение бидисперсного облака капель с диаметрами $D_1 = 5$ мм и $D_2 = 1$ мм, графики $\tau = \varphi_1(x)$, $\tau = \varphi_2(x)$ для которых представлены на рис. 3.

По заданному значению x^* , например $x^* = 2.0$ м, находим из графиков (см. рис. 3) времена $\tau_1 = 0.64$ с, $\tau_2 = 0.69$ с прохождениями каплями диаметром D_1, D_2 расстояния $x^* + h$ и x^* соответственно.

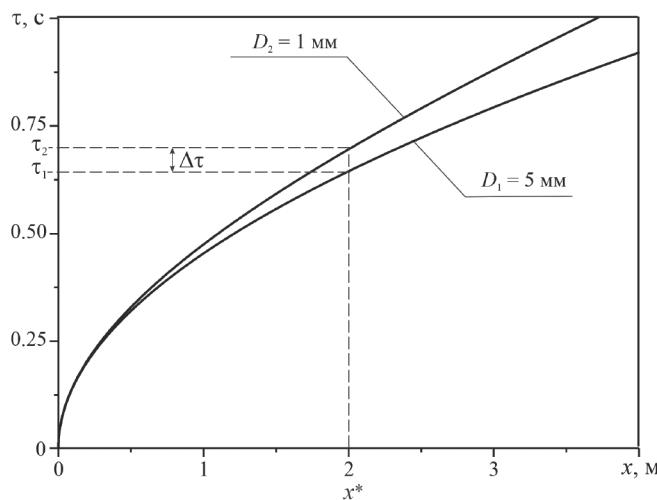


Рис. 3. Зависимости времени гравитационного осаждения капель разного диаметра от пройденного расстояния ($D_1 = 5.0$ мм, $D_2 = 1.0$ мм).

Задержку времени Δt между импульсами давления в камерах определяем по соотношению

$$\Delta t = \tau_2 - \tau_1 = \varphi_2(x^*) - \varphi_1(x^* + h) = 0.69 - 0.64 = 0.05 \text{ с} = 50 \text{ мс.}$$

В экспериментах расстояние между слоями капель (рис. 2) составляло $h = 14.4$ мм.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

С помощью рассмотренного стенда проведена серия экспериментов по исследованию динамики осаждения облака бидисперсных капель дистиллированной воды. Физические свойства воды, необходимые для расчета характеристик облака капель, приведены в табл. 1. Для получения капель контролируемых размеров использовались инъекционные иглы (инъекторы 16G, 18G, 21G), основные размеры которых (внутренний и наружный диаметры, длина) приведены в табл. 2. В табл. 2 приведены также измеренные весовым методом диаметры образующихся капель.

Таблица 1. Физические свойства дистиллированной воды при $T = 293$ К

Параметр	ρ , кг/м ³	μ , Па · с	σ , Н/м
Значение	998	$1.002 \cdot 10^{-3}$	$72.28 \cdot 10^{-3}$

Табл. 2. Характеристики инъекторов и измеренные весовым методом диаметры образующихся капель, мм

Инъектор	$d_{\text{вн}}$	$d_{\text{вн}}$	l	D
16 G	1.19	1.65	40	3.66 ± 0.04
18 G	0.84	1.27	40	3.20 ± 0.03
21 G	0.51	0.82	40	2.88 ± 0.01

На рис. 4а представлена качественная картина гравитационного осаждения облака бидисперсных капель с диаметрами $D_1 = 3.7$ мм и $D_2 = 2.9$ мм, полученная видеосъемкой первой видеокамерой, расположенной вблизи исследуемой области, с полем съемки размером $10 \times 10 \text{ см}^2$. На рис. 4б представлена качественная картина гравитационного осаждения облака бидисперсных капель, более близких по размеру ($D_1 = 3.7$ мм и $D_2 = 3.2$ мм), полученная видеосъемкой второй видеокамерой, регистрирующей всю исследуемую область осаждения облака капель высотой до 2 м.

Из приведенных на рис. 4 видеокадров следует, что для каждого из рассмотренных в процессе гравитационного осаждения облаков бидисперсных капель наблюдаются две основные стадии эволюции: I – образование и дви-

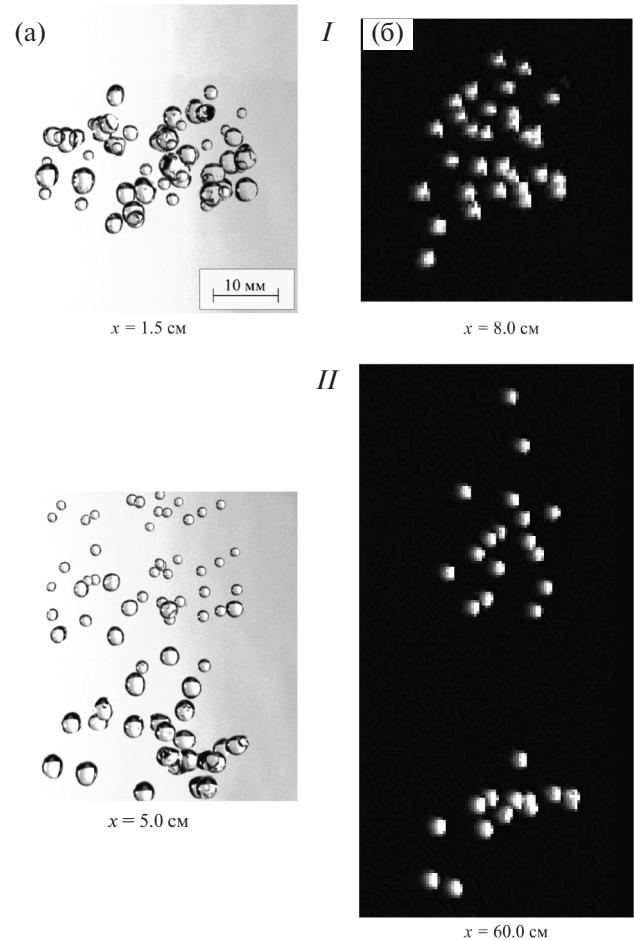


Рис. 4. Качественная картина гравитационного осаждения облака бидисперсных капель с диаметрами $D_1 = 3.7$ мм, $D_2 = 2.9$ мм (а) и $D_1 = 3.7$ мм, $D_2 = 3.2$ мм (б) на разных расстояниях x от плоскости ВВ: стадия I – образование облака бидисперсных капель; стадия II – расслоение облака на два кластера монодисперсных капель.

жение облака бидисперсных капель как единого целого; II – расслоение облака на два кластера монодисперсных капель. Для облака бидисперсных капель со значительно различающимися диаметрами $D_1 = 3.7$ мм и $D_2 = 2.9$ мм расслоение облака на два кластера проходит на меньшем расстоянии, чем для облака с близкими размерами капель.

На рис. 4а стадия I сохраняется на расстоянии $x = 1.5$ см от плоскости нижнего слоя капель (плоскость ВВ на рис. 2), а стадия II – на расстоянии $x = 5.0$ см. Для облака бидисперсных капель с диаметрами $D_1 = 3.7$ мм и $D_2 = 3.2$ мм (рис. 4б) стадия I сохраняется на расстоянии $x = 8.0$ см, а расслоение облака капель (стадия II) наблюдается на расстоянии $x = 60.0$ см.

В процессе экспериментов наряду с анализом качественной картины процесса осаждения измерялись скорости осаждения центра масс начального бидисперсного облака капель и центров масс каждого из кластеров монодисперсных капель. При проведении экспериментов реализовывался режим одновременного отрыва каждого из наборов капель от капилляров. Скорость осаждения определялась покадровой обработкой результатов видеосъемки с помощью программы CorelDRAW с погрешностью около 4 %. На рис. 5 представлены графики зависи-

мости измеренной скорости осаждения центра масс облака бидисперсных капель с диаметрами $D_1 = 3.7$ мм и $D_2 = 2.9$ мм от пройденного расстояния x . На этом же рисунке приведены аналогичные графики для осаждения одиночных капель, полученные численным решением уравнения осаждения одиночной капли диаметром 3.7 мм и 2.9 мм [9]. Из графиков следует, что на начальном промежутке времени капли движутся с одинаковой скоростью, а затем после расслоения облака капель на два кластера монодисперсных капель каждый из этих кластеров движется со скоростью, соответствующей скорости осаждения одиночной капли того же размера. Отклонение рассчитанных значений скорости одиночной капли от измеренной скорости центра масс кластера не превышает 2 %. Аналогичные зависимости получены для осаждения кластера с начальными диаметрами капель $D_1 = 3.7$ мм, $D_2 = 3.2$ мм (рис. 6).

Для проведенных экспериментов рассчитывались значения начальной концентрации капель для каждого из наборов капилляров. Начальная объемная концентрация рассчитывалась по формуле $C_{V0} = V_{\Sigma}/V$, где $V_{\Sigma} = (\pi D^3/6)N$ – суммарный объем капель, входящих в каждый монодисперсный кластер, а $V = D(\pi d_c^2/4)$ – начальный объем монодисперсного кластера. При $N = 20$, $d_c = 32$ мм

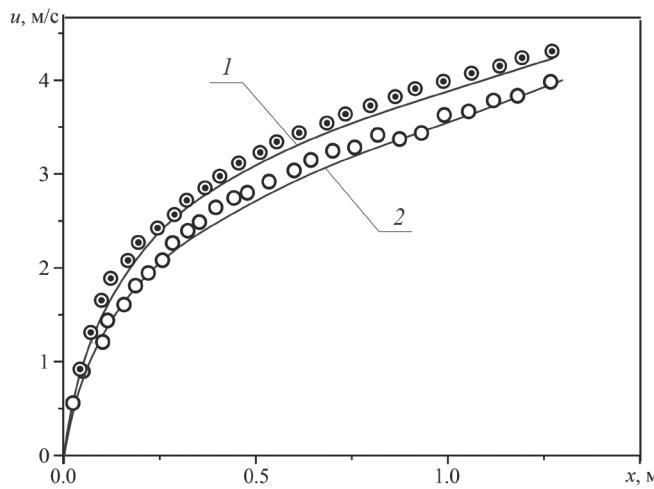


Рис. 5. Зависимости скорости осаждения кластера бидисперсных капель с диаметрами $D_1 = 3.7$ мм, $D_2 = 2.9$ мм от пройденного расстояния x : \odot – измеренные значения для кластера крупнодисперсных капель ($D_1 = 3.7$ мм); \circ – измеренные значения для кластера мелкодисперсных капель ($D_2 = 2.9$ мм); 1, 2 – рассчитанные зависимости $u(x)$ для одиночных капель диаметром 3.7 и 2.9 мм соответственно.

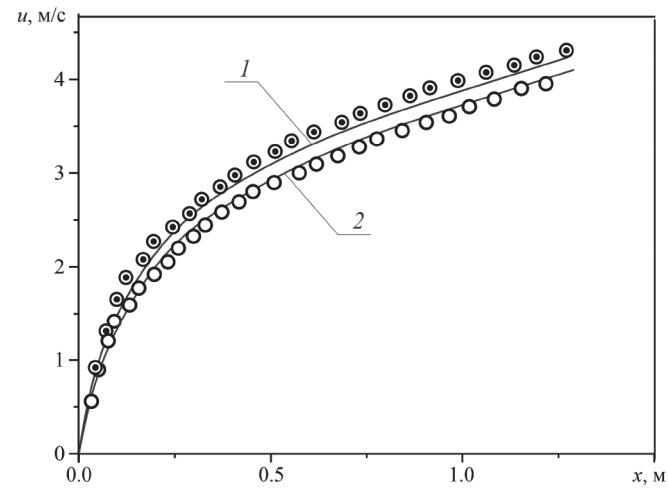


Рис. 6. Зависимости скорости осаждения кластера бидисперсных капель с диаметрами $D_1 = 3.7$ мм, $D_2 = 3.2$ мм от пройденного расстояния x : \odot – измеренные значения для кластера крупнодисперсных капель ($D_1 = 3.7$ мм); \circ – измеренные значения для кластера мелкодисперсных капель ($D_2 = 3.2$ мм); 1, 2 – рассчитанные зависимости $u(x)$ для одиночных капель диаметром 3.7 и 3.2 мм соответственно.

значения начальной объемной концентрации составляли $C_{V0} = 0.18$ для $D_1 = 3.7$ мм, $C_{V0} = 0.13$ для $D_2 = 3.2$ мм и $C_{V0} = 0.11$ для $D_2 = 2.9$ мм.

Из анализа видеокадров процесса осаждения облака следует, что начальная объемная концентрация капель резко падает при образовании бидисперсного облака в каждом из монодисперсных кластеров до значений $C_V \sim 0.02$, что соответствует осаждению в режиме “продуваемого” облака [10] и согласуется с результатами [9], полученными для осаждения монодисперсного кластера капель.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе полученных экспериментальных данных можно сделать следующие выводы.

1. Предложен новый способ получения облака бидисперсных капель с заданными значениями начальной объемной концентрации и размера крупнодисперсной и мелкодисперсной фракций.

2. Разработан стенд для исследования качественной картины и динамики гравитационного осаждения бидисперсного облака капель при варьировании характеристик каждой из фракций и времени задержки отрыва капель Δt от капилляров крупнодисперсной фракции от мелкодисперсной.

3. Проведена оценка значения Δt , обеспечивающего взаимодействие крупнодисперсных и мелкодисперсных фракций на заданном расстоянии от точки отрыва капель в зависимости от размеров входящих в облако капель.

4. Показано, что для условий проведенных экспериментов, характеризующихся образованием бидисперсного облака при одновременном отрыве двух горизонтальных слоев монодисперсных капель, на начальном участке осаждения облако движется как единое целое. На некотором расстоянии, зависящем от размеров капель, бидисперсное облако расслаивается на два кластера монодисперсных капель, каждый из которых движется в режиме “продуваемого” облака.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Исследование выполнено при поддержке Российской научного фонда (грант № 22-19-00307, <https://rscf.ru/project/22-19-00307/>).

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шрайбер А.А. Многофазные полидисперсные течения с переменным фракционным составом дискретных включений // Итоги науки и техники. Комплексные и специальные разделы механики. 1988. Т. 3. С. 3.
2. Волков Р.С., Керимбекова С.А., Стрижак П.А. // Письма в ЖТФ. 2021. Т. 47. № 22. С. 28. <https://doi.org/10.21883/PJTF.2021.22.51723.18791>
3. Saufi A.E., Calabria R., Chiariello F., Frassoldati A., Ciucci A., Faravelli T., Massoli P. // Chem. Eng. J. 2019. V. 375. 122006. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2019.122006>
4. Керимбекова С.А., Волков Р.С., Стрижак П.А. // Письма в ЖТФ. 2023. Т. 49. № 20. С. 3. <https://doi.org/10.61011/PJTF.2023.20.56337.19676>
5. Пажи Д.Г., Галустов В.С. Основы техники распыливания жидкостей. М.: Химия, 1984.
6. Архипов В.А., Басалаев С.А., Золоторёв Н.Н., Романдин В.И., Поленчук С.Н. Патент на изобретение № 2829293 РФ // Опубл. 30.10.2024. Бюл. № 31.
7. Адамсон А. Физическая химия поверхностей. М.: Мир, 1979.
8. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. М.: Наука, 1973.
9. Архипов В.А., Басалаев С.А., Золоторёв Н.Н., Перфильева К.Г., Усанина А.С. // Письма в ЖТФ. 2024. Т. 50. № 5. С. 19. <https://doi.org/10.61011/PJTF.2024.05.57179.19709>
10. Хоргуани В.Г., Калов Х.М. // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1975. Т. 11. № 3. С. 278.