

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ  
ОСАЖДЕНИЯ ОДИНОЧНЫХ КАПЕЛЬ И ЧАСТИЦ В ВЯЗКОЙ ЖИДКОСТИ****© Р. Р. Тулубаева, Я. Р. Хасанова, В. И. Валиуллина\*,  
А. А. Мусин, Л. А. Ковалева***Уфимский университет науки и технологий  
Россия, Республика Башкортостан, 450076 г. Уфа, ул. Заки Валиди, 32.**\*Email: valiullina.vilena@mail.ru*

*В работе исследуются процессы оседания одиночных элементов структуры дисперсной фазы в жидкой вязкой среде. Приведены результаты экспериментального моделирования динамики осаждения твердых сферических частиц в глицерине и в вазелиновом масле. Получено хорошее согласование скорости частиц разного размера со скоростью, рассчитанной по формуле Стокса. Также изучена динамика осаждения капли дистиллированной крашеной воды в синтетическом и вазелиновом маслах. Рассчитаны теоретические данные скоростей по формуле Рыбчинского-Адамара. Установлено, что более крупные капли при оседании сплющиваются и перестают следовать формуле Рыбчинского-Адамара.*

**Ключевые слова:** дисперсная система, осаждение, формула Стокса, формула Рыбчинского-Адамара.

**Введение**

Дисперсные системы являются широко используемыми в различных областях науки и промышленности, таких как фармацевтика, пищевая промышленность, нанотехнологии. Например, в фармацевтической промышленности изучение оседания частиц позволяет разработать более эффективные методы для создания лекарственных препаратов [1–2]. В нефтегазовой промышленности применяются передовые технологии для увеличения нефтеотдачи и повышения качества процессов добычи [3–4]. Пропантовые частицы вводятся в трещину в горной породе во время гидроразрыва пласта (ГРП) с целью предотвращения ее закрытия после снижения давления. Эффективное применение пропанта является ключевым фактором успеха ГРП, поскольку он способствует поддержанию открытости трещины и обеспечивает высокую добычу нефти или газа из пласта. С другой стороны, есть проблема разделения дисперсных систем, например водонефтяную эмульсию помещают в сепараторы для гравитационного отстоя. Изучение процесса осаждения частиц и капель в жидкой среде под воздействием внешних факторов позволит выявить условия эффективного расслоения и устойчивости дисперсных систем.

Имеется множество работ, посвященных седиментации твердых частиц, как численных [5–7], так и экспериментальных [8–9]. Например, статья [5] посвящена численному анализу поведения частиц в суспензии при различных условиях, что имеет важное значение для понимания гидродинамических процессов в коллоидных системах. При любой начальной концентрации закачиваемой в канал суспензии происходит миграция частиц от одной стенки канала к другой. Для вычисления скорости осаждения частиц в жидкости [6] нужно учитывать такие параметры, как размер частиц, концентрацию частиц в жидкости, плотность и вязкость. Между тем в работе [8] представлено экспериментальное моделирование динамики осаждения твердых сферических частиц в жидкой вязкой среде при различных концентрациях и температурах среды. В процессе нагрева дисперсионной среды наблюдалось, что частицы распределились равномерно по всему объему ячейки. Частицы оседают с большей скоростью в связи со способностью частиц к коагуляции.

В случае осаждения капель в дисперсионной среде интерес проявляется в использовании поверхностно-активных веществ (ПАВ) [10]. Некоторые поверхностно-активные вещества могут быть не так эффективны при снижении поверхностного натяжения на капле жидкости, требуя длительного времени для достижения этой цели.

Капли воды в эмульсии «вода в масле» оседают быстрее с увеличением температуры дисперсионной среды [11]. При наличии разницы температур в жидкости возникает конвективные течения, при этом капли эмульсии коагулируют и образуют более крупные агломераты, которые быстрее оседают на дно ячейки. Повышение температуры образования эмульсии с 10 до 40 °С приводит к увеличению среднего диаметра капель воды [12]. Между тем в работе [13] авторы численно изучили динамику осаждения капли воды в воздухе и получили, что при увеличении диаметра капель от 0.5 до 5.0 мм длина нестационарного участка траектории возрастает от 1 до 15 м. Также процессы осаждения и всплытия капель и пузырьков были смоделированы с помощью уравнений, описывающих динамику частиц в потоке [14].

Осаждение одиночных частиц и капель в жидкости является сложным многоэтапным процессом, включающим в себя взаимодействие между частицами, молекулами жидкости и влияние различных факторов, к

примеру гравитации, диффузии, термодинамических параметров и характеристик самих частиц. Для исследования таких сложных процессов необходимо понимать, как ведут себя одиночные элементы дисперсной фазы, поэтому целью настоящей статьи является экспериментальное исследование осаждения одиночных частиц и капель в жидкой вязкой среде. В рамках исследования рассматривается влияние на процесс осаждения различных параметров, таких как размер и форма частиц, плотность и вязкость жидкой среды.

### Материалы и методы

Для контроля физических параметров и анализа результатов исследования проводились на упрощенной модельной системе. В первой серии эксперимента объектом исследования являлась суспензия. В качестве дисперсионной среды были использованы глицерин и вазелиновое масло. Дисперсной фазой являлись твердые сферические частицы: частицы полиэтилена, пропанта фракций 16/20 и 30/50. Размеры частиц определялись с помощью инвертированного микроскопа Olympus IX71 с двукратным увеличением (рис. 1).



Рис. 1. Изображение твердых сферических частиц под микроскопом.

Во второй серии эксперимента объектом исследования являлась эмульсия типа «вода в масле». В качестве дисперсионной среды были использованы вазелиновое и синтетическое масла. Дисперсионной фазой являлись капли крашеной дистиллированной воды. Размеры капель наблюдались через длиннофокусный микроскоп (рис. 2).



Рис. 2. Фото капель под длиннофокусным микроскопом.

Полученные изображения обрабатывались в программе ImageJ. Результаты цифровой обработки представлены в табл. 1.

Таблица 1

Размеры элементов структуры дисперсной фазы

Вид элемента	Пропант 16/20	Пропант 30/50	Микробисер	Мелкая капля	Средняя капля	Крупная капля
Радиус, мкм	284±11	143±16	174±5	805±36	1 254±46	2 279±82

В работе использовались определенные стандартные фракции частиц (пропант), разница размеров которых имела большой разброс. Были также использованы частицы микробисера, размеры которых имеют промежуточные значения. Размеры капель были подобраны в соответствии с интервалами размеров частиц для сравнительного анализа результатов. Исследования проводились при температуре  $T = 297.15$  К. В табл. 2 приведена динамическая вязкость и плотность дисперсионной среды.

Таблица 2

Значения динамической вязкости и плотности дисперсионных сред

Дисперсионная среда	Глицерин	Вазелиновое масло	Синтетическое масло
Динамическая вязкость, Па·с	0.595±0.008	0.069±0.001	0.124±0.003
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	1 261±0.041	870±0.064	884±0.031

### Экспериментальные результаты

Экспериментальное исследование процесса осаждения твердых сферических частиц в жидкой среде было проведено на специально собранной лабораторной установке, основным элементом которой являлась прямоугольная ячейка с размерами  $15 \times 15 \times 6$  см, внутри которой находилась жидкость (рис. 3). За ячейкой был расположен источник света Sumita LS-M250. Процесс осаждения фиксировался на фотокамеру и длиннофокусный микроскоп. При оседании частиц в вазелиновом масле делались снимки ячейки с интервалом в 1 сек., в случае частиц в глицерине – каждые 5 сек.

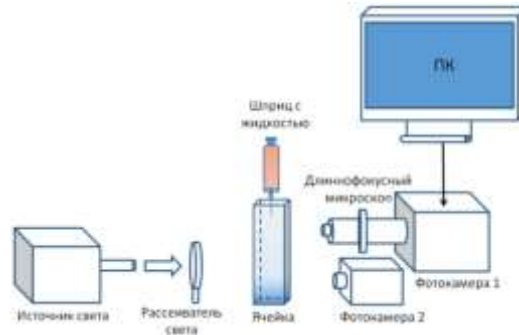


Рис. 3. Схема экспериментальной установки для исследования осаждения твердых частиц и капель.

Для выдавливания капель в дисперсионную среду использовался шприц. При оседании капель в дисперсионную среду каждую секунду делался снимок ячейки. Полученные изображения обрабатывались в пакете программ MATLAB в измерительной системе PIV (Particle Image Velocimetry). Погрешность экспериментальных значений скоростей оценивалась по данным 5 измерений стандартными методами определения погрешностей.

Для корреляции полученных значений скорости седиментации одиночных частиц были подсчитаны теоретические значения скорости осаждения по формуле Стокса [15]:

$$u = \frac{2gr^2(\rho' - \rho)}{9\mu}, \quad (1)$$

где  $g$  – ускорение свободного падения,  $r$  – средний радиус частицы,  $\rho'$  – плотность частицы,  $\rho$  – плотность среды,  $\mu$  – динамическая вязкость среды.

На рис. 4 представлена зависимость скорости осаждения частиц от размера частиц. Видно, что чем больше радиус и плотность частиц, тем быстрее происходит осаждение. Получено хорошее согласование скорости частиц разного размера со скоростью, рассчитанной по формуле Стокса.

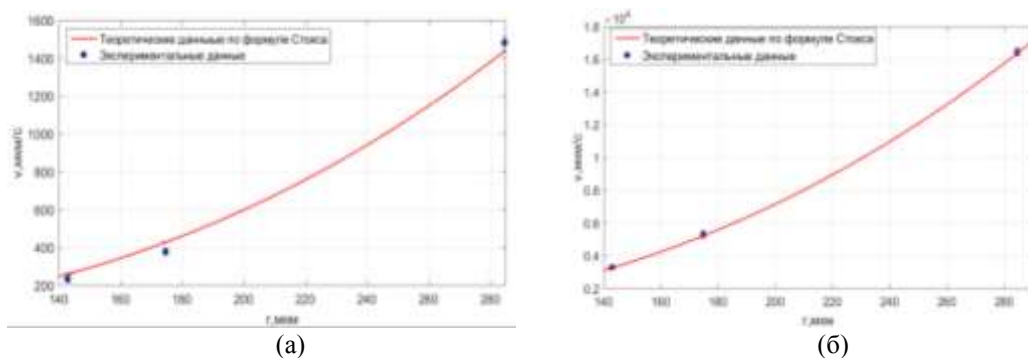


Рис. 4. Сравнение экспериментальных значений скоростей одиночных частиц с теоретическими: (а) в глицерине; (б) в вазелиновом масле.

Для корреляции полученных значений скорости осаждения капель были подсчитаны теоретические значения скорости осаждения по формуле Рыбчинского-Адамара [15]:

$$u = \frac{2(\rho' - \rho)gr^2}{3\mu} \frac{\mu + \mu'}{2\mu + 3\mu'}, \quad (2)$$

где  $r$  – средний радиус капли,  $\rho$  – плотность среды,  $\rho'$  – плотность капли,  $\mu$  – динамическая вязкость среды,  $\mu'$  – динамическая вязкость капли.

Было замечено, что капли большого размера испытывают деформацию и их форма существенно отклоняется от сферической. При падении капля сплющивается, приобретая форму выпуклой чечевицы. Скорость падения таких капель перестает следовать формуле (2) и вычисляется по следующей формуле [15]:

$$u = \sqrt{\frac{2(\rho - \rho')gr}{3K}}, \tag{3}$$

где  $r$  – средний радиус капли,  $\rho'$  – плотность капли,  $\rho$  – плотность среды,  $K$  – коэффициент сопротивления.

На *рис. 5* представлена зависимость скорости осаждения капель от их радиуса. Из графика видно, что в случае увеличения радиуса при тех же граничных и начальных условиях для температуры, скорость осаждения капель была выше, что согласуется с формулой Рыбчинского-Адамара.

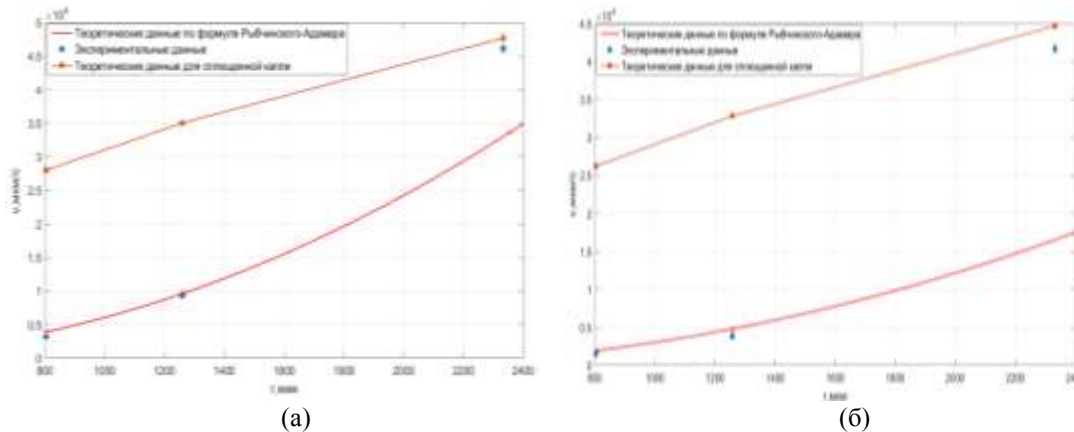


Рис. 5. Сравнение экспериментальных значений скоростей капель с теоретическими в маслах: (а) вазелиновом; (б) синтетическом.

Из *рис. 5* видно, что в промежутке между размерами 1 600 и 2 300 мкм формула Рыбчинского-Адамара перестает описывать результаты экспериментальных данных и скорость описывается формулой (3) для крупных капель. Причем в случае оседания капель в вазелиновом масле для крупных капель скорость, рассчитанная по формуле Рыбчинского-Адамара, отличается от экспериментальных данных на 30%, тогда как в случае с синтетическим маслом это отличие составляет более 50%. Это связано с тем, что при относительно одинаковой плотности этих масел их вязкости отличаются в 2 раза, что приводит к разной степени деформаций крупных капель в процессе их осаждения.

Из соотношения скоростей оседания частиц и капель разного размера в вазелиновом масле (*рис. 6*) видно, что капли в вазелиновом масле оседали намного быстрее, чем частицы.

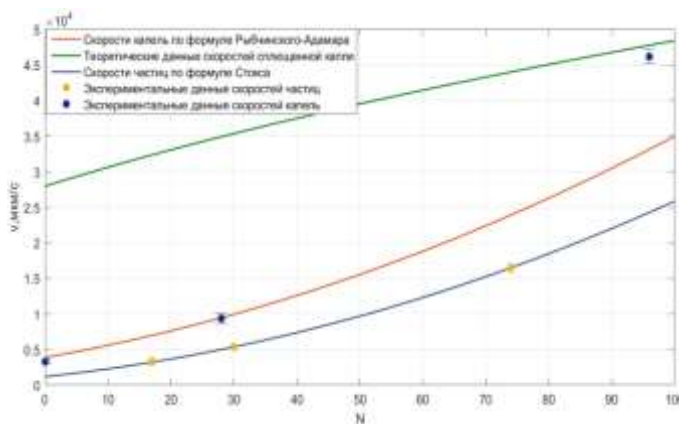


Рис. 6. Скорости оседания частиц и капель в вазелиновом масле.

Это объясняется тем, что частицы в 2 раза плотнее, чем капли, и радиусы капель намного больше, чем у частиц. Так как гравитационное осаждение частиц и капель представляет собой сложный многоступенчатый процесс, который включает взаимодействие между частицами [16], полученные результаты, описывающие характер гравитационного осаждения одиночных сферических частиц и капель, могут быть применены в исследованиях суспензий и эмульсий, чтобы избежать проблемы с коагуляцией, когда группа частиц начинает объединяться, что влияет на их осаждение и ведет к изменению свойств всего раствора, как это было в статье [8].

### Заключение

Были представлены экспериментальные исследования осаждения одиночных частиц и капель в жидкой вязкой среде. Выявлено, что скорость оседания зависит от размера частицы, ее плотности и вязкости среды. Получено хорошее согласование скорости частиц разного размера со скоростью, рассчитанной по формуле

Стокса. В случае увеличения радиуса при тех же граничных и начальных условиях для температуры, скорость осаждения капель была выше, что согласуется с формулой Рыбчинского-Адамара. Крупные по размеру капли при падении деформируются и перестают подчиняться формуле Рыбчинского-Адамара. Также капли в синтетическом масле вытягиваются сильнее, чем в вазелиновом масле из-за разных значений вязкости среды. Было проведено сравнение скорости осаждения частиц со скоростью осаждения капель в одинаковых средах. Получено, что более крупные и менее плотные капли оседают быстрее, чем меньшие и более плотные частицы. Полученные результаты будут использованы для дальнейшего исследования динамики эмульсионной и суспензионной систем в неизотермических условиях.

*Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда №22-11-20042.*

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Стороженко С. Е. и др. Разработка и фармакокинетическое исследование оригинальной лекарственной формы-суспензии гликлазида // Вопросы биологической, медицинской и фармацевтической химии. 2020. Т. 23. №12. С. 31–35.
2. Смоленцев С. Ю. Гематологические и биохимические показатели крови коз при применении суспензии хлореллы // Ветеринарный врач. 2023. №6. С. 26–32.
3. Ковальчук Т. Н., Гильманов А. Я., Шевелев А. П. Методика расчета дополнительной накопленной добычи нефти после применения технологии выравнивания профиля приемистости // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2022. Т. 333. №6. С. 131–139.
4. Жигарев В. А. и др. Экспериментальное исследование процессов довытеснения нефти из модельного керна при помощи полимерных растворов и наносуспензий // Енисейская теплофизика. 2023. С. 368–369.
5. Юлмухаметова Р. Р., Мусин А. А., Ковалева Л. А. Численное моделирование ламинарного течения суспензии в плоском канале // Вестник Башкирского университета. 2021. Т. 26. №2. С. 281–286.
6. Хуссейн С. и др. Математическая модель измерения концентрации наночастиц в жидкости в процессе их осаждения. Результаты расчетов // Международный научно-исследовательский журнал. 2021. №3-1(105). С. 89–106.
7. Сарабиан М. и др. Численное моделирование осаждения сферы в простых сдвиговых потоках текучих сред с пределом текучести // Журнал механики жидкости. 2020. Т. 896. С. 17.
8. Замула Ю. С. и др. Экспериментальное моделирование динамики осаждения твердых сферических частиц, диспергированных в вязкой жидкости // Вестник Башкирского университета. 2019. Т. 24. №4. С. 794–798.
9. Архипов В. А. и др. Исследование коэффициента гидродинамического сопротивления твердых сферических частиц в неизотермических условиях // Динамика многофазных сред (ДМС-2021). 2021. С. 41–41.
10. Hoffman H. et al. Controlling droplet deposition with surfactants // Physical Review Fluids. 2021. Vol. 6. No. 3. P. 033601.
11. Valiullina V. I. et al. Experimental study of the stratification of polydisperse emulsions in a cell with heated walls // Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing, 2021. Vol. 2057. No. 1. P. 012041.
12. Nebogina N. A., Prozorova I. V., Yudina N. V. The influence of the temperature of formation of water-oil emulsions on their dispersion // AIP Conference Proceedings. 2020. Vol. 2310. No. 1. P. 020221
13. Архипов В. А. и др. Анализ режимов гравитационного осаждения капли // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. 2023. №86. С. 21–34.
14. Келбалиев Г. И. оглы, Расулов С. Р. оглы, Валиев Н. Г. оглы. Математическое моделирование процессов осаждения и всплытия твердых частиц, капель и пузырьков в изотропном турбулентном потоке // Известия Уральского государственного горного университета. 2020. №4(60). С. 123–145.
15. Левич В. Г. Физико-химическая гидродинамика. 1959. 700 с.
16. Happel J., Brenner G. Hydrodynamics at low Reynolds numbers. Moscow: Mir. 1976. 564 p.

*Поступила в редакцию 02.08.2024 г.*

DOI: 10.33184/bulletin-bsu-2024.4.4

**EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE DEPOSITION  
OF SINGLE DROPLETS AND PARTICLES IN A VISCOUS LIQUID****© R. R. Tulubaeva, Ya. R. Khasanova, V. I. Valiullina\*,  
A. A. Musin, L. A. Kovaleva***Ufa University of Science and Technology  
32 Zaki Validi st., 450076 Ufa, Republic of Bashkortostan, Russia.**\*Email: valiullina.vilena@mail.ru*

The paper investigates the processes of settling of single elements of the dispersed phase structure in a liquid viscous medium. The results of experimental modeling of the dynamics of precipitation of solid spherical particles in glycerin and in paraffin oil are presented. A good agreement has been obtained between the velocity of particles of different sizes and the velocity calculated according to Stokes' law. The dynamics of precipitation of a drop of distilled colored water in synthetic and paraffin oils has also been studied. Theoretical velocity data are calculated using the Rybchinsky-Hadamard formula. It was observed that larger droplets flatten during subsidence and cease to follow the Rybchinsky-Hadamard law.

**Keywords:** dispersed system, sedimentation, Stokes formula, Rybchinsky-Hadamard formula.

*Received 02.08.2024.*