УДК 532.3

DOI: 10.33184/bulletin-bsu-2019.4.4

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ОСАЖДЕНИЯ ТВЕРДЫХ СФЕРИЧЕСКИХ ЧАСТИЦ, ДИСПЕРГИРОВАННЫХ В ВЯЗКОЙ ЖИДКОСТИ

© Ю. С. Замула*, В. И. Валиуллина, А. А. Мусин, Л. А. Ковалева

*Бакирский государственный университет
Россия, Республика Башкортостан, 450076 г. Уфа, ул. Заки Валиди, 32.**Тел./факс: + 7 (347) 229 96 43.***Email: yuriyzamula@gmail.com*

В работе исследуются процессы оседания системы частиц, диспергированных в вязкой жидкости. Приведены результаты экспериментального моделирования динамики осаждения частиц при различных начальных концентрациях и в зависимости от температуры системы. Эксперименты проводились с использованием ячейки из монолитного поликарбоната с возможностью контроля температуры. Определена скорость полного расслоения дисперсной системы. Получены зависимости скорости осаждения системы частиц от исходной концентрации частиц и температуры среды. Проведено сравнение результатов экспериментальных исследований с теоретическими данными, полученными по формуле Стокса. Наблюдалось, что с увеличением начальной концентрации частиц скорость полного расслоения возрастает выше теоретической, что связано со способностью частиц к коагуляции.

Ключевые слова: дисперсная система, осаждение, вязкая жидкость, коагуляция.

Введение

Исследование динамики расслоения дисперсных систем под влиянием внешних факторов является актуальной задачей в механике многофазных сред. Интерес связан также с моделированием физико-химических процессов при решении таких задач, как очистка водоемов, расслоение эмульсий на отдельные фазы, распространение и осаждение аэрозолей и многих других [1–3]. Существует ряд работ, как теоретических [4–6], так и экспериментальных [7–9], посвященных изучению поведения твердых частиц в жидкости. В частности, в работе [8] была определена качественная картина осаждения высококонцентрированного облака твердых частиц. Эволюция осаждающихся под действием силы тяжести капель суспензии в вязкой жидкости вблизи вертикальной стенки была исследована в режиме Стокса течения с использованием точно-силовой модели в работе [10]. В кратковременном масштабе кластеры из небольшого числа близких твердых сферических частиц случайной конфигурации, оседающих в вязкой жидкости при малых числах Рейнольдса, были экспериментально исследованы в работе [9].

Не менее важным вопросом при моделировании задач динамики многофазных систем является зависимость скорости движения частиц от их объемной концентрации [11–12]. При увеличении концентрации дисперсной системы возникают трудности в связи с тем, что необходимо учитывать влияние частиц друг на друга и на динамику расслоения системы в целом [13]. В связи с этим изучение процесса расслоения дисперсной системы представляет большой научный и практический интерес. Целью данной работы является экспериментальное моделирование процесса осаждения твердых сферических частиц различной концент-

рации в вязкой жидкости при малых числах Рейнольдса.

Материалы и методы

Моделирование гравитационного осаждения диспергированных частиц в вязкой жидкости проводилось с помощью экспериментальной установки (рис. 1а), основной частью которой служила специально разработанная ячейка, выполненная из монолитного поликарбоната. Ячейка состоит из двух полостей, которые разделены перегородкой толщиной 2 мм (рис. 1б). Исследование осаждения частиц рассматривалось в прямоугольной вертикальной полости с внутренними размерами 50x50x2 мм, равномерный нагрев которой происходил с помощью поддержания температуры в соседней полости размером 50x50x10 мм за счет циркуляции воды, подогреваемой с помощью термостата LOIP LT-117b, работающего в диапазоне температур от 20 до 100°C.

Для моделирования осаждения грубодисперсной системы в ячейке используются твердые частицы (рис. 2а), диспергированные в глицерине. Размер частиц определялся с использованием оптического микроскопа Olympus IX71, полученные изображения обрабатывались с помощью программы ImageJ. На рис. 2б представлена диаграмма распределения частиц по размерам, рассчитанный средний радиус частиц составил 0.3 мм. Плотность частиц определялась объемным методом и составила 2550 кг/м³.

Смесь изготавливалась путем добавления частиц в глицерин с заданной концентрацией. Удаление образовавшихся в процессе перемешивания пузырьков воздуха осуществлялось с помощью вакуумирования всего объема смеси.

Рис. 1. Схема экспериментальной установки (а) и поперечный разрез ячейки (б).

Рис. 2. Оптическое изображение исходных твердых частиц (а) и диаграмма распределения частиц по размерам (б).

Экспериментальные результаты

В процессе исследования вязкая жидкость с диспергированным в ней частицами с заданной концентрацией помещалась в область эксперимента ячейки (рис. 1б), находящейся в горизонтальном положении, при этом частицы распределялись равномерно по всему объему. Далее производился поэтапный нагрев ячейки от 20 до 70°C с шагом 10°C. При установлении каждой температуры положение ячейки изменялось с горизонтального на вертикальное, после чего частицы начинали оседать под действием гравитационных сил. Время оседания частиц фиксировалось с помощью секундомера, рассчитывалась скорость полного расслоения системы. Эксперименты включали несколько опытов с различной начальной концентрацией частиц в ячейке в диапазоне 1÷15%об.

Полученная из эксперимента зависимость скорости полного расслоения дисперсной системы от начальной концентрации частиц при различных температурах приведена на рис. 3.

Из рис. 3 видно, что при низких температурах (до 30°C) зависимость скорости расслоения частиц от концентрации выражена слабо, при температурах 40–50°C эта зависимость становится заметной. Максимальный рост скорости расслоения наблюдается при температурах 60–70°C. Кроме того, прослеживается предельная концентрация C в интервале от 7.5 до 10%, при которой происходит резкий скачок скорости расслоения, в особенности при высоких температурах.

Рис. 3. Зависимость скорости полного расслоения дисперсной системы от концентрации частиц при различных температурах T .

С целью сравнения результатов экспериментальных исследований с теоретическими данными для используемого диапазона размеров частиц (рис. 2б) была рассчитана скорость их оседания при различных температурах по закону Стокса [14]:

$$v_{\text{осед}} = \frac{2}{9} r_0^2 g \frac{(\rho_2 - \rho_1)}{\mu(T)} \quad (1)$$

где ρ_1 , μ – плотность и динамическая вязкость дисперсионной среды, ρ_2 , r_0 – плотность и радиус частиц, g – ускорение свободного падения. Данная зависимость применима для одиночных частиц, так как не учитывается взаимодействие между ними и является справедливой при малых числах Рейнольдса, когда можно пренебречь инерционными слагаемыми [15]. Справедливость формулы (1) для оценочных вычислений обосновывается тем, что все

эксперименты в данной работе были проведены при малых числах Рейнольдса ($10^{-4} \div 0.5$).

Изменение вязкости глицерина от температуры учитывалось на основании зависимости, представленной на *рис. 4*, которая построена по данным работы [16]. Изменение плотности глицерина в зависимости от температуры составляет не более 3%, поэтому при расчетах скорости оседания частиц данной зависимостью можно пренебречь. Контрольные сравнительные измерения вязкости проводились на вискозиметре Brookfield DV-II+ Pro.

Рис. 4. Зависимость вязкости глицерина от температуры.

На *рис. 5* представлен график зависимости скорости оседания одиночных частиц от их радиуса, построенный при различных температурах. Диапазон изменения радиуса частиц выбран исходя из размеров частиц, используемых в экспериментах (*рис. 2б*).

Рис. 5. Зависимость скорости оседания от размеров частиц.

Видно, что диапазон изменения скорости оседания одиночных частиц находится в пределах от 0 до 8 мм/с, что согласуется с большинством значений скорости полного расслоения дисперсной системы при малых концентрациях, полученных экспериментальным путем (*рис. 4*).

Для наглядности сравнения результатов на *рис. 6* представлены экспериментальные и теоретические кривые зависимости скорости полного расслоения дисперсной системы от температуры среды. Экспериментальные кривые построены при различной начальной концентрации частиц. Теоретическая кривая построена для одиночной частицы радиусом 0,3 мм.

Рис. 6. Зависимость скорости полного расслоения дисперсной системы от температуры среды при различной начальной концентрации частиц C .

Из *рис. 6* видно, что увеличение температуры среды приводит к увеличению скорости полного расслоения, т.е. время полного расслоения дисперсной системы уменьшается. Это связано с уменьшением вязкости несущей фазы с увеличением температуры (*рис. 4*). При этом результаты экспериментальных исследований, полученные при концентрации частиц менее 7,5% в пределах погрешности, согласуются с теоретической кривой. Увеличение концентрации частиц более 7,5% приводит к росту скорости расслоения дисперсной системы. Полученные результаты противоречат результатам расчетов по формуле (1), а также теоретическим представлениям о том, что с увеличением концентрации частиц в системе увеличивается ее эффективная вязкость, вследствие чего скорость осаждения частиц уменьшается. Однако, вполне очевидно, что последнее утверждение справедливо для невзаимодействующих частиц. В условиях же представленного в настоящей работе эксперимента наблюдалось, что используемые частицы способны к коагуляции, поэтому, объединяясь в кластеры, они оседают с большей скоростью. При этом, чем больше концентрация частиц, тем интенсивнее происходит процесс коагуляции, и, соответственно, резко возрастает скорость расслоения системы.

Заключение

Приведены результаты экспериментального моделирования процесса расслоения дисперсной системы, состоящей из твердых сферических частиц, диспергированных в вязкой жидкости. Показано, что скорость полного расслоения дисперсной системы зависит от концентрации частиц и температуры среды. При этом обнаружено, что существуют некоторые характерные значения температуры и концентрации частиц, выше которых имеет место заметное увеличение скорости расслоения системы. Проведенный сравнительный анализ результатов экспериментального исследования с теоретическими данными показал, что отклонение экспериментальных кривых от теоретических свя-

зано со способностью частиц к коагуляции. Полученные результаты могут быть использованы при исследовании аналогичных процессов в многофазных средах, таких, например, как различные типы эмульсионных систем.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект №19-11-00298).

ЛИТЕРАТУРА

1. Дерягин Б. В. Устойчивость коллоидных систем (теоретич. аспект) // Успехи химии. 1979. Т. 48. №4. С. 675–721.
2. Киреев В. А. Курс физической химии. Изд. 3-е, перераб. и доп. М.: Химия. 1975. 745 с.
3. Kovaleva L., Musin A. Numerical modeling of heavy hydrocarbon liquid heating // Brazilian Journal of Chemical Engineering. 2016. Vol. 33. No. 1. P. 169–175.
4. Bosse T. et al. Numerical simulation of finite Reynolds number suspension drops settling under gravity // Physics of Fluids. 2005. V. 17. №3. С. 037101.
5. Мусин А. А., Тухбатова Э. Р., Анисенкова Н. А. Исследование интенсивности расслоения высоковязкой водонефтяной эмульсии в емкости с нагретыми боковыми стенками // Вестник Баш. ун-та. 2017. Т. 22. №3.
6. Pityuk Yu. A., Abramova O. A., Fatkullina N. B., Bulatova A. Z. BEM Based Numerical Approach for the Study of the Dispersed Systems Rheological Properties // Studies in Systems, Decision and Control. 2019. Vol. 15. P. 338–352.
7. Metzger B., Nicolas M., Guazzelli É. Falling clouds of particles in viscous fluids // Journal of Fluid Mechanics. 2007. Vol. 580. P. 283–301.
8. Архипов В. А., Усанина А. С. Гравитационное осаждение высококонцентрированной системы твердых сферических частиц // Теплофизика и аэромеханика. 2017. Т. 24. №5. С. 739–750.
9. Alabrudziński S. et al. Particle clusters settling under gravity in a viscous fluid // Physics of Fluids. 2009. Vol. 21. No. 7. P. 073302.
10. Mylyk A. et al. Break-up of suspension drops settling under gravity in a viscous fluid close to a vertical wall // Physics of fluids. 2011. Vol. 23. No. 6. P. 063302.
11. Соу С. Гидродинамика многофазных систем. М.: Мир, 1971. 536 с.
12. Броунштейн Б. И., Фишбейн Г. А. Гидродинамика, массо- и теплообмен в дисперсных системах. Л.: Химия. 1977. 280 с.
13. Архипов В. А., Басалаев С. А., Усанина А. С. Коэффициент сопротивления совокупности твердых сферических частиц при гравитационном осаждении // Механика многофазных сред (подсекция II – 5): мат-лы XII Всерос. съезда фундамент. проблемам теорет. и прикладной механики. Уфа. 2019. С. 27–28.
14. Landau L. D., Lifshitz E. M. Electrodynamics Of Continuous Media. Nauka, Moscow, 1982. 622 p.
15. Слезкин Н. А. Динамика вязкой несжимаемой жидкости. М.: Гос. изд-во технико-теорет. Литературы, 1955. 521 с.
16. Segur J. B., Oberstar H. E. Viscosity of glycerol and its aqueous solutions // Industrial and Engineering Chemistry. 1951. Vol. 43. No. 9. P. 2117–2120.

Поступила в редакцию 27.09.2019 г.

DOI: 10.33184/bulletin-bsu-2019.4.4

**EXPERIMENTAL MODELING OF THE SETTLING DYNAMICS
OF SOLID SPHERICAL PARTICLES DISPERSED IN A VISCOUS LIQUID**

© Yu. S. Zamula*, V. I. Valiullina, A. A. Musin, L. A. Kovaleva

*Bashkir State University
32 Zaki Validi Street, 450076 Ufa, Republic of Bashkortostan, Russia.**Phone: + 7 (347) 229 96 43.***Email: yuriyzamula@gmail.com*

The process of settlement of particle system dispersed in viscous liquid is studied in this work. The results of experimental modeling of settling dynamics of the particles at different initial concentrations and its dependence on the temperature of the system are presented. The experiments were carried out using a cell made of monolithic polycarbonate with the ability of temperature control. The average rate of stratification of the dispersed system is determined. The dependences of the settling rate of the particle system on the initial particle concentration and medium temperature were obtained. The results of experimental studies were compared with theoretical data obtained by the Stokes formula. It was observed that with an increase in the initial concentration of particles, the average rate of stratification increases above the theoretical one, which is associated with the ability of particles to coagulate.

Keywords: dispersed system, settling, viscous liquid, coagulation.

Published in Russian. Do not hesitate to contact us at bulletin_bsu@mail.ru if you need translation of the article.

REFERENCES

1. Deryagin B. V. Uspekhi khimii. 1979. Vol. 48. No. 4. Pp. 675–721.
2. Kireev V. A. Kurs fizicheskoi khimii. 3 ed. pererab. i dop. [A course in physical chemistry. 3rd Ed. revised and extended]. Moscow: Khimiya. 1975.
3. Kovaleva L., Musin A. Brazilian Journal of Chemical Engineering. 2016. Vol. 33. No. 1. Pp. 169–175.
4. Bosse T. et al. Numerical simulation of finite Reynolds number suspension drops settling under gravity. Physics of Fluids. 2005. Vol. 17. No. 3. Pp. 037101.
5. Musin A. A., Tukhatova E. R., Anisenkova N. A. Vestnik Bash. un-ta. 2017. Vol. 22. No. 3.
6. Pityuk Yu. A., Abramova O. A., Fatkullina N. B., Bulatova A. Z. Studies in Systems, Decision and Control. 2019. Vol. 15. Pp. 338–352.
7. Metzger B., Nicolas M., Guazzelli É. Falling clouds of particles in viscous fluids //Journal of Fluid Mechanics. 2007. Vol. 580. Pp. 283–301.
8. Arkhipov V. A., Usanina A. S. Teplofizika i aeromekhanika. 2017. Vol. 24. No. 5. Pp. 739–750.
9. Alabrudziński S. et al. Particle clusters settling under gravity in a viscous fluid //Physics of Fluids. 2009. Vol. 21. No. 7. Pp. 073302.
10. Myłk A. et al. Break-up of suspension drops settling under gravity in a viscous fluid close to a vertical wall. Physics of fluids. 2011. Vol. 23. No. 6. Pp. 063302.
11. Sou S. Gidrodinamika mnogofaznykh system [Hydrodynamics of multiphase systems]. Moscow: Mir, 1971.
12. Brounshtein B. I., Fishbein G. A. Gidrodinamika, masso- i teploobmen v dispersnykh sistemakh [Hydrodynamics, mass and heat transfer in dispersed systems]. Leningrad: Khimiya. 1977.
13. Arkhipov V. A., Basalaev S. A., Usanina A. S. Mekhanika mnogofaznykh sred (podseksiya II – 5): mat-ly XII Vseros. s"ezda fundament. problemam teoret. i prikladnoi mekhaniki. Ufa. 2019. Pp. 27–28.
14. Landau L. D., Lifshitz E. M. Electrodynamics Of Continuous Media. Nauka, Moscow, 1982.
15. Slezkin N. A. Dinamika vyazkoi neszhimaemoi zhidkosti [Dynamics of a viscous incompressible fluid]. Moscow: Gos. izd-vo tekhniko-teoret. Literatury, 1955.
16. Segur J. B., Oberstar H. E. Industrial and Engineering Chemistry. 1951. Vol. 43. No. 9. Pp. 2117–2120.

Received 27.09.2019.