МЕХАНИКА

УДК 532.5.01
DOI 10.17223/19988621/66/6

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

ОСАЖДЕНИЕ БИДИСПЕРСНОГО КЛАСТЕРА ТВЕРДЫХ СФЕРИЧЕСКИХ ЧАСТИЦ[1]

Представлены результаты экспериментального исследования гравитационного осаждения бидисперсного кластера твердых сферических частиц в вязкой жидкости. Разработана экспериментальная установка для исследования осаждения сферического полидисперсного кластера равномерно перемешанных частиц с нулевой начальной скоростью осаждения и с контролируемым значением начальной объемной концентрации частиц. Получены качественные и количественные данные по движения бидисперсного кластера твердых сферических частиц. Проведен сравнительный анализ характеристик осаждения моно- и бидисперсного кластера частиц.

Ключевые слова: *бидисперсный кластер частиц*, *гравитационное осаждение*, *коэффициент сопротивления*, *экспериментальное исследование.*

Исследование характеристик движения кластера частиц при осаждении в поле силы тяжести представляет интерес в задачах экологии (в частности, очистка воды от угольной пыли в открытых разрезах) и метеорологии, в теплоэнергетике, в химической технологии и в ряде других отраслей техники и технологии [1, 2].

Для определения эволюции формы и скорости осаждения кластера частиц используются, как правило, результаты экспериментальных исследований, так как теоретический анализ задачи не позволяет однозначно определить данные параметры [3–7]. Результаты экспериментальных исследований закономерностей гравитационного осаждения совокупности твердых частиц приведены в работах [8–16]. Анализ известных экспериментальных методов показал, что одним из определяющих факторов, влияющих на характеристики осаждения частиц, является способ введения частиц в жидкость.

В настоящей работе представлены метод и результаты экспериментального исследования гравитационного осаждения с нулевой начальной скоростью бидисперсного кластера твердых сферических частиц в вязкой жидкости.

Описание установки и методика проведения эксперимента

Схема установки [17] для исследования осаждения кластера твердых частиц приведена на рис. 1. Установка состоит из прозрачной кюветы с жидкостью, выполненной в виде прямоугольной призмы размером 300×300×900 мм, погруженного в вязкую жидкость сферического контейнера, наполненного твердыми сфе-

[1] Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 15-19-10014) и Минобрнауки РФ в рамках государственного задания No. 0721-2020-0036..

рическими частицами и системы визуализации. Контейнер состоит из неподвижной *1* и подвижной *2* водонепроницаемых оболочек, заполненный частицами *3*. Подвижная оболочка закреплена на оси *4*, установленной в подшипниках *5* с возможностью ее вращения. Заполненный частицами контейнер закрывают поворотом подвижной оболочки и помещают в кювету *6* с жидкостью *7*. После этого контейнер наполняют водой через патрубок *8* с вентилем *9* из емкости *10*, излишек воды вытесняется через дренажную трубку *11*. Перемешивание частиц с водой в контейнере производится воздействием ультразвуковых колебаний от генератора *12* типа УЗГМ-10-22МС. В процессе перемешивания постепенно вода вытесняется вязкой жидкостью, подаваемой в контейнер из емкости *13* через вентиль *14* и патрубок *15*. После полного замещения воды вязкой жидкостью контейнер открывают, и сферический кластер частиц начинает осаждаться в кювете с жидкость. Визуализация осаждения проводится в двух ракурсах с использованием видеокамер *16* типа «Citius C 100» и «Panasonic HDC-SD60».

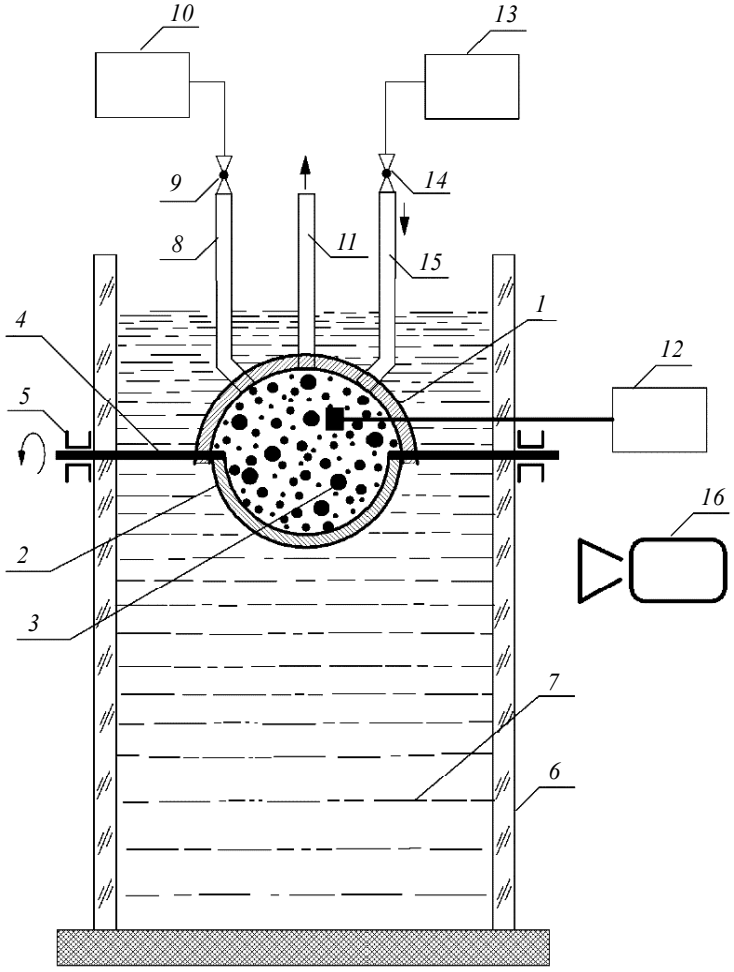

Рис. 1. Схема экспериментальной установки
Fig. 1. Schematic diagram of the experimental setup

Время открытия контейнера, обеспечивающее минимальную деформацию кластера в период открытия, определяется формулой [17]

$$\Delta t \le \frac{0.45\, D_c\, \mu_l}{(\rho_p - \rho_l) D_{\max}^2 g}, \tag{1}$$

где D_c – диаметр контейнера; μ_l – коэффициент динамической вязкости жидкости; ρ_p – плотность материала частиц; ρ_l – плотность жидкости; $D_{\max}$ – диаметр наиболее крупных частиц в кластере; g – ускорение свободного падения.

Начальная объемная концентрация частиц в кластере определяется формулой

$$C_0 = \frac{1}{D_c^3} \sum_{i=1}^{n} N_i D_i^3, \tag{2}$$

где N_i, D_i – количество и диаметр частиц i-й фракции.

Результаты экспериментального исследования

Экспериментальное исследование гравитационного осаждения бидисперсного кластера твердых сферических частиц в вязкой жидкости проводилось с использованием смеси шариков из стали марки 95Х18 диаметром 2 и 3 мм. Плотность материала частиц $\rho_p = 7748$ кг/м^3 измерялась взвешиванием на аналитических весах набора из 100 шариков. Для ввода частиц в вязкую жидкость использовался контейнер диаметром $D_c = 28$ мм. В качестве жидкости использовалось силиконовое масло ПМС-10000. Плотность жидкости $\rho_l = 972$ кг/м^3 измерялась ареометром при температуре эксперимента. Коэффициент динамической вязкости жидкости $\mu_l = (9.78 \pm 0.03)$ Па·с при $T = 23.5$ °С измерялся по скорости стационарного осаждения в стоксовском режиме (при числах Рейнольдса $\mathrm{Re} << 1$) стального шарика диаметром 3 мм. Время открытия контейнера, рассчитанное по формуле (1), составляло $\Delta t = 0.2$ с.

Предварительно определялись характеристики осаждения одиночных частиц диаметром D_i, входящих в кластер ($D_1 = 2$ мм, $D_2 = 3$ мм). В табл. 1 приведены измеренные и рассчитанные значения скорости осаждения u_i. Расчет скорости осаждения проводился для стоксовского режима ($\mathrm{Re}_i << 1$) по формуле [18]

$$u_i = \frac{(\rho_p - \rho_l)}{18\mu_l} g D_i^2. \tag{3}$$

Здесь же приведены значения чисел Рейнольдса для одиночных частиц:

$$\mathrm{Re}_i = \frac{\rho_l u_i D_i}{\mu_l}. \tag{4}$$

Таблица 1

Характеристики осаждения одиночных частиц, входящих в кластер

i	D_i, мм	u_i, см/с		$\mathrm{Re}_i \cdot 10^3$
		экспер.	расчет	
1	2	0.15	0.151	0.30
2	3	0.34	0.340	1.01
3	2.6	–	0.255	0.66

Для бидисперсного кластера частиц при оценке u_i, Re_i по формулам (3), (4) в первом приближении использовался диаметр эквивалентной частицы диаметром

D_3, объем которой равен полусумме объемов входящих в кластер частиц разных размеров:

$$D_3 = \sqrt[3]{0.5\left(D_1^3 + D_2^3\right)}.$$

Скорость осаждения кластера частиц, и пройденное им расстояние определялись покадровой обработкой результатов скоростной видеосъемки. Скорость осаждения на высоте h_i (i – номер кадра) рассчитывалась по формуле:

$$u_c(h_i) = \left(h_{i+1} - h_{i-1}\right)/\Delta t_i, \quad i = 1,2,...n,$$

где h_{i+1}, h_{i-1} – пройденное кластером расстояние на i–1 и i+1 видеокадрах; Δt_i – интервал времени между i–1 и i+1 видеокадрами; n – количество видеокадров. Расстояние h_i, пройденное кластером, определялось по его центральной точке. По полученным экспериментальным данным рассчитывалось число Рейнольдса для кластера частиц

$$\mathrm{Re}_c = \frac{\rho_l u_c D_c}{\mu_l}. \tag{5}$$

Экспериментальное значение коэффициента сопротивления кластера рассчитывалось по формуле [18]

$$C_D = \frac{4}{3}\frac{gD_c}{u_c^2} C_0 \left(\frac{\rho_p}{\rho_l} - 1\right). \tag{6}$$

Для сравнения характеристик осаждения моно- и бидисперсного кластера частиц были проведены эксперименты с осаждением частиц одинакового диаметра и их смеси. Условия экспериментов и осредненные по результатам 5 дублирующих опытов характеристики осаждения (C_0, ρ_c, u_c, $\overline{u_c} = u_c/u_i$, Re_c, C_D) монодисперсного и бидисперсного кластера частиц приведены в табл. 2. Значения C_0, Re_c, C_D рассчитывались по формулам (2), (5), (6), плотность кластера частиц – по формуле

$$\rho_c = \rho_l + C_0\left(\rho_p - \rho_l\right).$$

Таблица 2

Условия проведения и результаты экспериментов

	D_i, мм		C_0	ρ_c, кг/м^3	u_c, см/с	$\overline{u_c}$	Re_c	C_D	
	2	3						экспер.	расчет
N_i	300	-	0.11	1717	3.26	21.7	0.09	264	267
	-	300	0.37	3479	10.20	30.0	0.28	91	86
	150	150	0.24	2598	5.86	23.4	0.16	178	150

Здесь же приведены рассчитанные для стоксовского режима осаждения значения коэффициента сопротивления кластера:

$$C_D = \frac{24}{\mathrm{Re}_c}. \tag{7}$$

На рис. 2 приведены видеокадры гравитационного осаждения моно- и бидисперсного кластера частиц для разных моментов времени. Анализ экспериментальных данных показал, что качественная картина осаждения сферического бидисперсного и монодисперсного кластера частиц аналогичны. Для условий проведенных экспериментов процесс осаждения можно разделить на три стадии: движение сферы, формирование и движение сфероида с образованием циркуляции периферийных частиц, деформация сфероида и отрыв частиц от его поверхности.

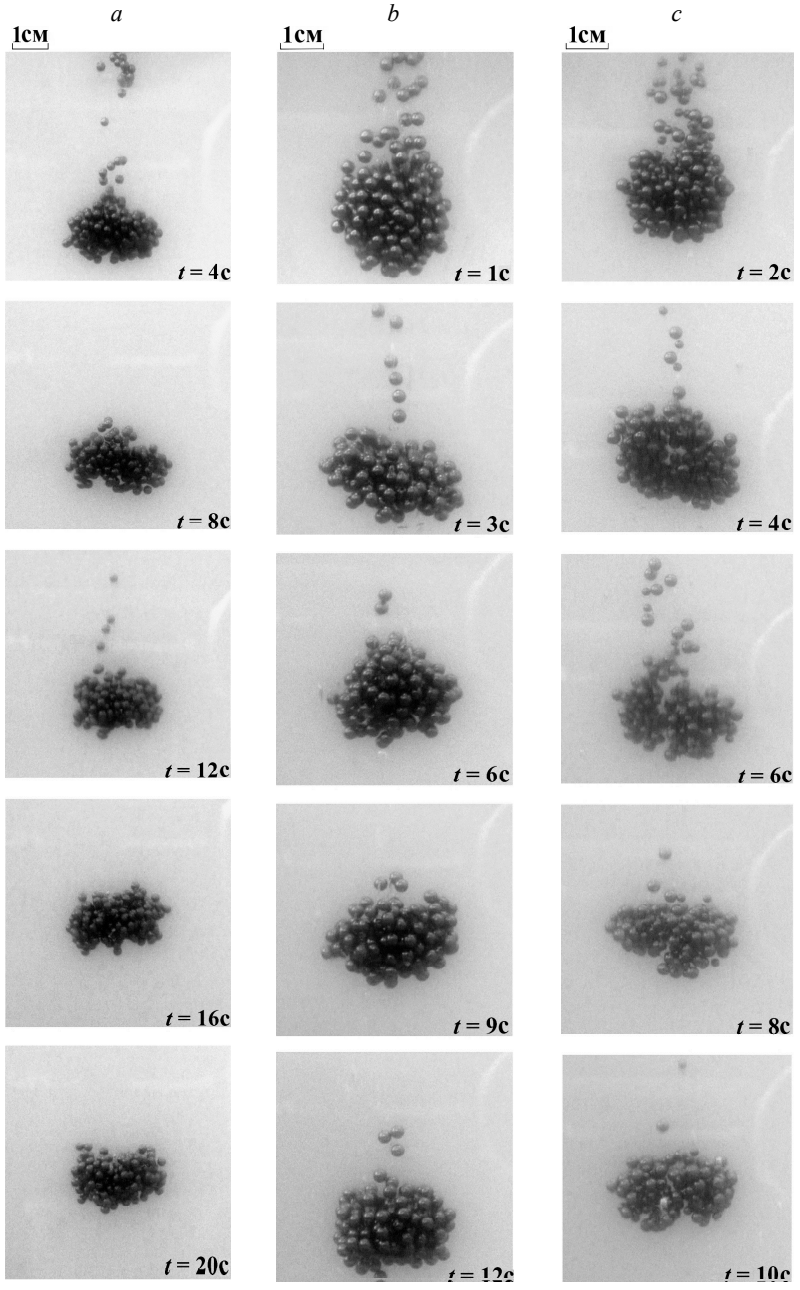

Рис. 2. Видеокадры осаждения кластеров частиц: *a* – монодисперсный кластер частиц ($D_1 = 2$ мм); *b* – монодисперсный кластер частиц ($D_2 = 3$ мм); *c* – бидисперсный кластер частиц ($D_3 = 2.6$ мм)

Fig. 2. Video frames of the particle cluster sedimentation: (*a*) monodisperse particle cluster ($D_1 = 2$ mm), (*b*) monodisperse particle cluster ($D_2 = 3$ mm), and (*c*) bidisperse particle cluster ($D_3 = 2.6$ mm)

В отличие от результатов [15, 16], стадия распада сфероида не наблюдалась, что связано с большими значениями начальной концентрации частиц в настоящей работе. Отметим, что процесс осаждения бидисперсного кластера частиц характеризуется более интенсивным вытеснением с поверхности в окружающую жидкость частиц меньшей фракции, а также более интенсивной циркуляции периферийных частиц в направлении, противоположном движению кластера.

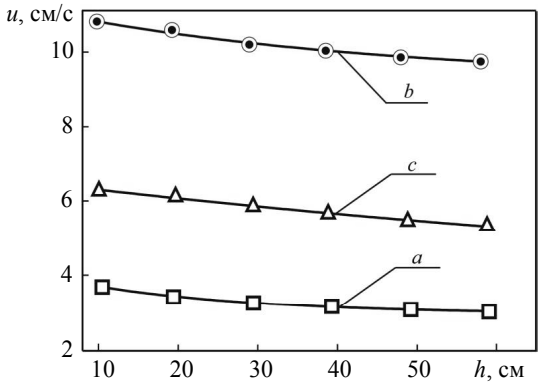

Рис. 3. Зависимость скорости осаждения кластера частиц от пройденного расстояния: *a* –монодисперсный кластер частиц ($D_1 = 2$ мм); *b* – монодисперсный кластер частиц ($D_2 = 3$ мм); *c* – бидисперсный кластер частиц ($D_3 = 2.6$ мм)

Fig. 3. Velocity of the particle cluster sedimentation as a function of the covered distance: (*a*) monodisperse particle cluster ($D_1 = 2$ mm), (*b*) monodisperse particle cluster ($D_2 = 3$ mm), and (*c*) bidisperse particle cluster ($D_3 = 2.6$ mm)

На рис. 3 представлены зависимость скорости осаждения моно- и бидисперсного кластера частиц от пройденного расстояния. Для всех проведенных серий экспериментов наблюдалось монотонное снижение на 12–15 % скорости кластера по траектории его движения, что можно объяснить уменьшением ρ_c за счет срыва частиц с его поверхности.

Показано, что основным фактором, влияющим на скорость осаждения кластера частиц, является его начальная концентрация. С увеличением C_0 от 0.11 до 0.37 скорость осаждения (измеренная для $h = 300$ мм) возрастает от 3.26 до 10.20 см/с. Отметим, что значения безразмерной скорости осаждения кластера для всех проведенных серий имеют близкие значения ($\overline{u_c} = 23$–30). Значение коэффициента сопротивления $C_D = 264$ для монодисперсного кластера с $D_i = 2$ мм соответствует стоксовскому режиму осаждения ($C_D = 24/\mathrm{Re}_c = 267$). Для бидисперсного кластера частиц значение $C_D = 178$ на 45 % превышает расчетное ($C_D = 24/\mathrm{Re}_c = 122$).

Выводы

- Представлен способ исследования, обеспечивающий моделирование осаждения сферического полидисперсного кластера равномерно перемешанных частиц с нулевой начальной скоростью осаждения и с контролируемым значением начальной объемной концентрации частиц.
- Экспериментально показано, что качественная картина осаждения бидисперсного кластера частиц аналогична осаждению монодисперсного кластера частиц и характеризуется более интенсивным вытеснением с поверхности кластера в жидкость частиц меньшей фракции, а также более интенсивной циркуляцией периферийных частиц в направлении, противоположном движению кластера.
- Скорость движения кластера частиц монотонно уменьшается по его траектории, введение кластера с большей концентрацией частиц приводит к увеличению скорости осаждения.

• Показано, что в отличие от монодисперсного кластера частиц, значение коэффициента сопротивления бидисперсного кластера частиц не соответствует формуле (5) для стоксовского режима осаждения.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Романков П.Г.*, *Курочкина М.И.* Гидромеханические процессы химической технологии. Л.: Химия, 1982.
2. *Броунштейн Б.И.*, *Фишбейн Г.А.* Гидродинамика, массо- и теплообмен в дисперсных средах. Л.: Химия, 1977.
3. *Васенин И.М.*, *Дьяченко Н.Н.*, *Ёлкин К.Е.*, *Нариманов Р.К.* Математическое моделирование двухфазных конвективных течений с малыми частицами // Прикладная механика и техническая физика. 2004. Т. 45. № 6. С. 19–25.
4. *Невский Ю.А.*, *Осипцов А.Н.* Моделирование гравитационной конвекции суспензий // Письма в ЖТФ. 2009. Т. 35. № 7. С. 98–105.
5. *Пикущак Е.В.*, *Миньков Л.Л.* Влияние поправки Озеена на выражение для скорости оседания мелких частиц в бидисперсной суспензии // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. 2015. № 33. С. 88–95. DOI: 10.17223/19988621/33/9.
6. *Матвиенко О.В.*, *Андропова А.О.* Исследование движения частицы в потоке жидкости вблизи подвижной стенке // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. 2015. № 36. С. 85–92. DOI: 10.17223/19988621/36/10.
7. *Дик И.Г.*, *Миньков Л.Л*, *Неессе Т.* Гидродинамическая модель ускорения седиментации мелких частиц в бидисперсной суспензии // Теплофизика и аэромеханика. 2001. Т. 8. № 2. С. 283–294.
8. *Хоргуани В.Г.* О характере и скорости падения системы частиц одинаковых размеров // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1966. Т. 2. № 4. С. 394–401.
9. *Metzger B.*, *Nicolas M.*, *Guazzelli E.* Falling clouds of particles in viscous fluids // J. Fluid Mechanics. 2007. V. 580. P. 283–301. DOI: 10.1017/S0022112007005381.
10. *Daniel W.B.*, *Ecke R.E.*, *Subramanian G.*, *Koch D.L.* Clusters of sedimenting high-Reynolds-number particles // J. Fluid Mechanics. 2009. V. 625. P. 371–385. DOI: 10.1017/S002211200900620X
11. *Ekiel-Jezewska M.L.*, *Metzger B.*, *Guazzelli E.* Spherical cloud of point particles falling in a viscous fluid // Phys. Fluids. 2006. V. 18. P. 038104-1–038104-2. DOI: 10.1063/1.2186692.
12. *Yin X.*, *Koch D.L.* Hindered settling velocity and microstructure in suspensions of solid spheres with moderate Reynolds numbers // Phys. Fluids. 2007. V. 19. P. 093302-1–093302-15. DOI: 10.1063/1.2764109.
13. *Anthony J.C. Ladd*. Sedimentation of homogeneous suspensions of non-Brownian spheres // Physics of Fluids. 1997. V. 9. No. 3. P. 491–499. DOI 10.1063/1.869212.
14. *Mylyk A.*, *Meile W.*, *Brenn G.*, *Ekiel-Jezewska M.L.* Break-up of suspension drops settling under gravity in a viscous fluid close to a vertical wall // Phys. Fluids. 2011. V. 23. P. 063302-1–063302-14. DOI: 10.1063/1.3600660.
15. *Архипов В.А.*, *Усанина А.С.* Режимы осаждения консолидированной системы твердых сферических частиц // Известия РАН. Механика жидкости и газа. 2017. № 5. С. 74–85. DOI 10.7868/S0568528117050085.
16. *Архипов В.А.*, *Усанина А.С.* Гравитационное осаждение высококонцентрированной системы твердых сферических частиц // Теплофизика и аэромеханика. 2017. Т. 24. № 5. С. 739–750.
17. *Архипов В.А.*, *Басалаев С.А.*, *Перфильева К.Г.*, *Маслов Е.А.* Способ исследования осаждения сферического облака полидисперсных твердых частиц в вязкой жидкости // Патент на изобретение РФ № 2703935. Опубл.: 22.10.2019 г. Бюл. № 30.
18. *Архипов В.А.*, *Васенин И.М.*, *Усанина А.С.*, *Шрагер Г.Р.* Динамическое взаимодействие частиц дисперсной фазы в гетерогенных потоках. Томск: Издательский Дом Томского государственного университета, 2019.

Статья поступила 22.12.2019 г.

Arkhipov V.A., Basalaev S.A., Zolotorev N.N., Perfil'eva K.G. (2020) SEDIMENTATION OF A BIDISPERSE CLUSTER OF SOLID SPHERICAL PARTICLES. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Matematika i mekhanika* [Tomsk State University Journal of Mathematics and Mechanics]. 66. pp. 77–85

DOI 10.17223/19988621/66/6

Keywords: bidisperse particle cluster, gravitational sedimentation, drag coefficient, experimental study.

A new method for the experimental study of gravitational sedimentation of a polydisperse cluster of solid spherical particles in a viscous fluid is presented. The method is based on the preliminary ultrasonic mixing of the particles in a spherical container and assumes the introduction of a spherical cluster of particles at a given concentration and zero initial velocity into a fluid. This method is used to determine sedimentation characteristics of a bidisperse cluster of particles (steel balls, 2 and 3 mm in diameter) in silicone oil. A qualitative pattern of the cluster evolution, a sedimentation rate, and a drag coefficient are obtained. A comparative analysis of sedimentation characteristics of monodisperse and bidisperse particle clusters is carried out in the range of Reynolds numbers $\mathrm{Re} = (0.30 \div 0.66) \cdot 10^{-3}$. It is shown that, in contrast to a monodisperse cluster of particles, the drag coefficient of the bidisperse cluster of particles does not correspond to a correlation $C_D = 24/\mathrm{Re}_c$ for the Stokes sedimentation.

Financial support. This study was supported by the Russian Science Foundation (project No. 15-19-10014) and the Ministry of Education and Science of the Russian Federation within the framework of State Assignment No. 0721-2020-0036.

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

Sergey A. BASALAEV (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

Nikolay N. ZOLOTOREV (Candidate of Physics and Mathematics, Research Institute of Applied Mathematics and Mechanics of Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation). E-mail: nikzolotorev@mail.ru

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

REFERENCES

1. Romankov P.G., Kurochkina M.I. (1982) *Gidromekhanicheskie protsessy khimicheskoy tekhnologii* [Hydromechanical processes in chemical technology]. Leningrad: Khimiya.
2. Brownstein B.I., Fishbein G.A. (1977) *Gidrodinamika*, *masso- i teploobmen v dispersnykh sredakh* [Hydrodynamics, mass and heat transfer in disperse systems]. Leningrad: Khimiya.
3. Vasenin I.M., D'yachenko N.N., Elkin K.E., Narimanov R.K. (2004) Mathematical modeling of two-phase convective flows with fine particles. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*. 45(6). pp. 788–793. DOI: 10.1023/B:JAMT.0000046025.09468.9a.
4. Nevskiy Yu.A., Osiptsov A.N. (2009) Modeling gravitational convection in suspensions. Technical Physics Letters. 35(7). pp. 340–343. DOI: 10.1134/S1063785009040154.
5. Pikushchak E.V., Min'kov L.L. (2015) Vliyanie popravki Ozeena na vyrazhenie dlya skorosti osedaniya melkikh chastits v bidispersnoy suspenzii [Influence of Oseen's correction on fine particle settling velocity formula for bidisperse suspension]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Matematika i mekhanika – Tomsk State University Journal of Mathematics and Mechanics.* 33. pp. 88–95. DOI: 10.17223/19988621/33/9.

6. Matvienko O.V., Andropova A.O. (2015) Issledovanie dvizheniya chastitsy v potoke zhidkosti vblizi podvizhnoy stenki [Studying the particle motion in a fluid flow in the vicinity of a movable wall]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Matematika i mekhanika – Tomsk State University Journal of Mathematics and Mechanics.* 36. pp. 85–92. DOI: 10.17223/19988621/36/10.
7. Dueck J.G., Minkov L.L., Neesse T. (2001) A hydrodynamic model for enhanced sedimentation of small particles in a bidisperse suspension. *Thermophysics and Aeromechanics*. 8. pp. 259–269.
8. Horguani V.G. (1966) O kharaktere i skorosti padeniya sistemy chastits odinakovykh razmerov [On the pattern and velocity of settling for a system of equal-sized particles]. *Izvestiya AN SSSR. Fizika atmosfery i okeana – Izvestiya. Atmospheric and Oceanic Physics.* 2(40). pp. 394–401.
9. Metzger B., Nicolas M., Guazzelli E. (2007) Falling clouds of particles in viscous fluids. *Journal of Fluid Mechanics*. 580. pp. 283–301. DOI: 10.1017/S0022112007005381.
10. Daniel W.B., Ecke R.E., Subramanian G., Koch D.L. (2009) Clusters of sedimenting high-Reynolds-number particles. *Journal of Fluid Mechanics*. 625. pp. 371–385. DOI: 10.1017/S002211200900620X.
11. Ekiel-Jezewska M.L., Metzger B., Guazzelli E. (2006) Spherical cloud of point particles falling in a viscous fluid. *Physics of Fluids.* 18. pp. 038104-1–038104-2. DOI: 10.1063/1.2186692.
12. Yin X., Koch D.L. (2007) Hindered settling velocity and microstructure in suspensions of solid spheres with moderate Reynolds numbers. *Physics of Fluids.* 19. pp. 093302-1–093302-15. DOI: 10.1063/1.2764109.
13. Anthony J.C. Ladd. (1997) Sedimentation of homogeneous suspensions of non-Brownian spheres. *Physics of Fluids*. 9(3). pp. 491–499. DOI: 10.1063/1.869212.
14. Mylyk A., Meile W., Brenn G., Ekiel-Jezewska M.L. (2011) Break-up of suspension drops settling under gravity in a viscous fluid close to a vertical wall. *Physics of Fluids*. 23. pp. 063302-1–063302-14. DOI: 10.1063/1.3600660.
15. Arkhipov V.A., Usanina A.S. (2017) Regimes of sedimentation of a consolidated system of solid spherical particles. *Fluid Dynamics*. 52. pp. 666–677. DOI: 10.1134/S0015462817050088.
16. Arkhipov V.A., Usanina A.S. (2017) Gravitational settling of a highly concentrated system of solid spherical particles. *Thermophysics and Aeromechanics*. 24. pp. 719–730. DOI: 10.1134/S0869864317050079.
17. Arkhipov V.A., Basalaev S.A., Perfil'eva K.G., Maslov E.A. (2019) Sposob issledovaniya osazhdeniya sfericheskogo oblaka polidispersnykh tverdykh chastits v vyazkoy zhidkosti [A method of studying sedimentation of a spherical cloud of polydisperse solid particles in a viscous fluid]. RF Patent 2703935.
18. Arkhipov V.A., Vasenin I.M., Usanina A.S., Shrager G.R. (2019) *Dinamicheskoe vzaimodeystvie chastits dispersnoy fazy v geterogennykh potokakh* [Dynamic interaction of disperse phase particles in heterogeneous flows]. Tomsk: Tomsk State University Publishing House.

Received: December 22, 2019