

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ГРАВИТАЦИОННОГО ОСАЖДЕНИЯ КОНСОЛИДИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ ЧАСТИЦ

А.А. Антонникова, В.А. Архипов, А.С. Усанина, С.С. Титов

Предложены методы экспериментального исследования гравитационного осаждения консолидированной системы твердых сферических частиц, основанные на введении частиц в жидкость и их визуализацию при движении. Эти способы отличаются механизмом введения в жидкость совокупности твердых частиц. Показано, что разработанные методы обеспечивают повышение точности определения основных характеристик и динамики осаждения совокупности частиц за счет создания исходного сферического облака с заданной концентрацией частиц и с нулевой начальной скоростью осаждения.

Ключевые слова: консолидированная система частиц, монодисперсные частицы, гравитационное осаждение, устройство для введения частиц, экспериментальные исследования.

ВВЕДЕНИЕ

Закономерности движения консолидированной системы твердых частиц в двухфазном потоке являются предметом интенсивных исследований как российских, так и зарубежных ученых [1–3]. Интерес к проблеме движения концентрированного облака частиц связан с широким спектром применения получаемых результатов. В частности, в задачах эффективной очистки водоемов от примесей требуется знать оптимальную концентрацию осадительной дисперсной системы. При перемешивании твердых частиц с жидкостью необходимо знать скорость осаждения дисперсной примеси. В большинстве работ динамика движения совокупности частиц исследуется применительно к задаче гравитационного осаждения [4–7].

Процесс осаждения консолидированной системы твердых частиц в поле силы тяжести зависит от ряда параметров – размера и формы частиц, физико-химических свойств жидкости и твердых частиц, начальной концентрации частиц в облаке, режима движения (продуваемое, частично продуваемое, непродуваемое облако) [2]. На закономерности осаждения совокупности частиц также влияет способ введения частиц в жидкость.

В настоящей работе представлены два метода исследования гравитационного осаждения консолидированной системы частиц, отличающиеся механизмом формирования сферического облака частиц. В предложенных методах достигнуты три режима движения облака из совокупности частиц.

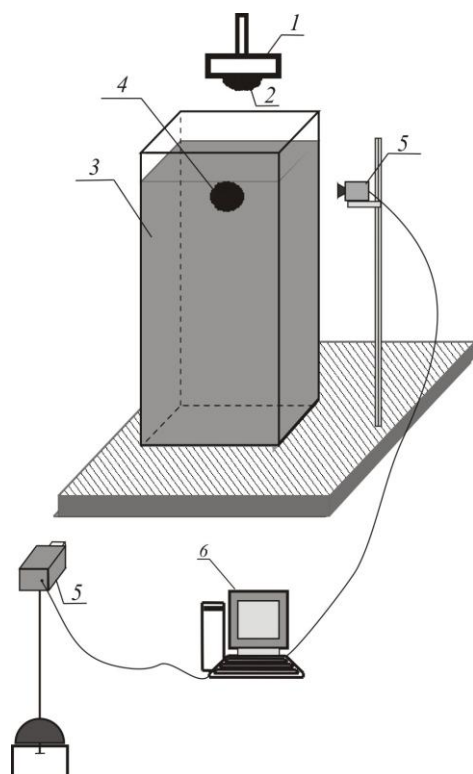
ИССЛЕДОВАНИЕ ОСАЖДЕНИЯ СОВОКУПНОСТИ ЧАСТИЦ В РЕЖИМЕ НЕПРОДУВАЕМОГО ОБЛАКА

В режиме непродуваемого облака закономерности движения совокупности частиц подобны движению равнообъемного шара или тела другой формы. При осаждении системы частиц увлекается вся среда внутри этой системы и группа частиц движется как единое целое.

Для исследования основных характеристик и динамики осаждения совокупности частиц в жидкости разработан способ, включающий введение смоченных сферических монодисперсных частиц в кювету с жидкостью, выполненную из прозрачного материала в виде правильной призмы, основанием которой является квадрат, и визуализацию процесса осаждения частиц [8]. Частицы предварительно смачивают водным раствором глицерина, размещают на пластину в виде компактно упакованного слоя в форме сферического сегмента, пластину с направленным вниз слоем частиц помещают в кювету с жидкостью (рисунок 1). Изменение формы, размера и скорости осаждения совокупности частиц определяют визуализацией с помощью скоростной видеосъемки, проводимой в двух ракурсах.

Предварительное смачивание частиц приводит к образованию жидкого слоя между совокупностью частиц и поверхностью пластины, обеспечивающего адгезию (прилипание) частиц к пластине. Количественная характеристика адгезии определяется капиллярными силами на линии трехфазного контакта [9]. Выбор водного раствора глицерина с концентрацией (95±99) мас. % обусловлен

хорошей смачиваемостью данной жидкостью поверхности частиц и пластины, что подтверждается специально проведенными экспериментами с использованием разных жидкостей. При смачивании частиц глицерином за счет адгезии образуется устойчивый слой частиц (рисунок 2).



1 – пластина; 2 – слой частиц; 3 – кювета;
4 – облако частиц; 5 – видеокамера;
6 – компьютер;

Рисунок 1 – Схема экспериментальной установки для исследования осаждения совокупности частиц в жидкости

При введении пластины со слоем твердых частиц в кювету с жидкостью происходит дезинтеграция и отрыв слоя частиц с образованием в начальный момент времени облака из совокупности частиц с формой, близкой к сферической. Далее реализуется гравитационное осаждение совокупности частиц с наблюдаемой эволюцией облака. Отрыв и дезинтеграция слоя частиц при введении в жидкий объем обусловлена исчезновением линии трехфазного контакта и, как следствие, прекращением действия капиллярных сил на ней. В результате динамика совокупности частиц определяется соотношением сил тяжести, Архимеда и гидродинамического сопротивления.

Наличие адгезионного эффекта (прилипание частиц к пластине) определяется характеристиками смачивающей жидкости, диаметром и плотностью материала частиц. Результаты экспериментов для частиц разных диаметров и плотности показали, что устойчивый слой частиц формируется при их предварительном смачивании раствором глицерина в воде лишь для частиц определенной массы, определяемой их диаметром и плотностью материала.

Максимальное значение массы одиночной частицы, при котором наблюдается образование устойчивого слоя, составляет $m = 33 \cdot 10^{-6}$ кг. Поэтому диаметр частиц выбирают из условия

$$D \leq 3 \sqrt[3]{\frac{6m}{\pi\rho}}, \quad (1)$$

где D – диаметр частиц; ρ – плотность материала частиц.

Подставляя значение $m = 33 \cdot 10^{-6}$ кг в формулу (1), получим

$$D = 3 \sqrt[3]{\frac{6 \cdot 33 \cdot 10^{-6}}{\pi\rho}} = \frac{3.98 \cdot 10^{-2}}{\sqrt[3]{\rho}} \text{ м}. \quad (2)$$

Формулу (2) можно представить в удобном для практических расчетов виде

$$D = \frac{40}{\sqrt[3]{\rho}}, \quad (3)$$

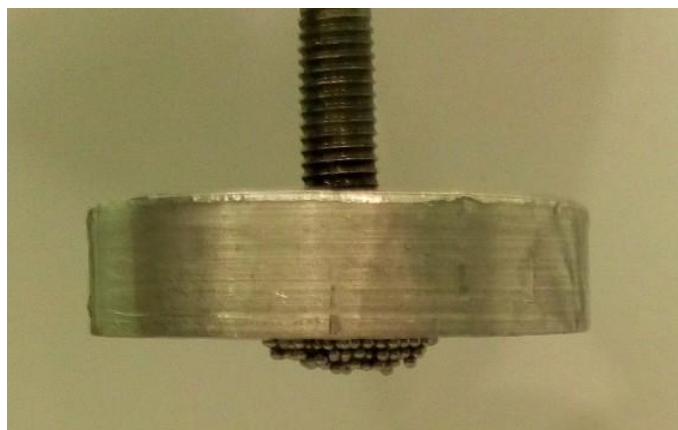
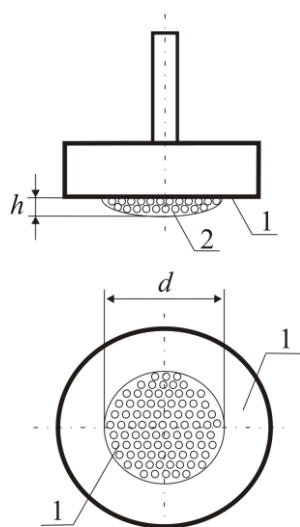
где $[D] = \text{мм}$; $[\rho] = \text{кг/м}^3$.

На эволюцию облака частиц и скорость его осаждения могут влиять стенки кюветы. Когда размеры кюветы и облака из совокупности частиц сравнимы, то наблюдается так называемое «стесненное осаждение» [1, 10], при котором скорость осаждения совокупности частиц уменьшается по мере увеличения их начальной объемной концентрации. Для исключения влияния стенок кюветы на закономерности гравитационного осаждения совокупности частиц при выборе стороны квадрата в основании кюветы использовалась оценка [10]

$$b \geq 10d. \quad (4)$$

При определении начальной объемной концентрации совокупности частиц в слое предполагается, что объем сферического сегмента, образуемого слоем, совпадает с объемом начального сферического облака из совокупности частиц, который формируется сразу же после введения частиц в жидкость.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ГРАВИТАЦИОННОГО ОСАЖДЕНИЯ КОНСОЛИДИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ ЧАСТИЦ



а) схема: 1 – поверхность пластины; 2 – слой частиц; б) фотография;
Рисунок 2 – Устройство для введения группы частиц в жидкость

Начальная объемная концентрация совокупности частиц в слое определяют по формуле:

$$C_0 = \frac{V}{V_s}, \quad (5)$$

где V – суммарный объем частиц; V_s – объем сферического сегмента, образующего слой частиц.

Подставляя в (5) значения V и V_s

$$V = \frac{M}{\rho}, \quad V_s = \left[\frac{1}{6} \pi h \left(\frac{3}{4} d^2 + h^2 \right) \right]^{-1},$$

получим формулу для определения начальной концентрации частиц:

$$C_0 = \frac{M}{\rho} \left[\frac{1}{6} \pi h \left(\frac{3}{4} d^2 + h^2 \right) \right]^{-1}, \quad (6)$$

где M – суммарная масса совокупности частиц (кг); d , h – диаметр и высота сферического сегмента слоя частиц (м).

Предложенный способ был апробирован проведением исследований по влиянию начальной концентрации на характер гравитационного осаждения и коэффициент сопротивления совокупности частиц при малых числах Рейнольдса [11]. В экспериментах начальная объемная концентрация частиц варьировалась в диапазоне $C_0 = 0.032 \div 0.47$ за счет изменения высоты h и диаметра d сферического сегмента слоя частиц в диапазонах $h = (1 \div 5)$ мм, $d = (5 \div 60)$ мм. В экспериментах использовались стальные диаметром $D = (0.2 \div 2.0)$ мм и стеклянные диаметром $D = 1.0$ мм шарики. Режим осаждения совокупности частиц варьировался за счет изменения коэффициента динамической вязкости жидкости (водные растворы глицерина) в диапазоне $\mu = (0.83 \div 1.34)$ Па·с и диаметра шариков. При этом диапазон изменения чисел Рейнольдса составлял $Re = (7 \cdot 10^{-2} \div 1.0)$.

ПОЛЗУНОВСКИЙ ВЕСТНИК № 3 2016

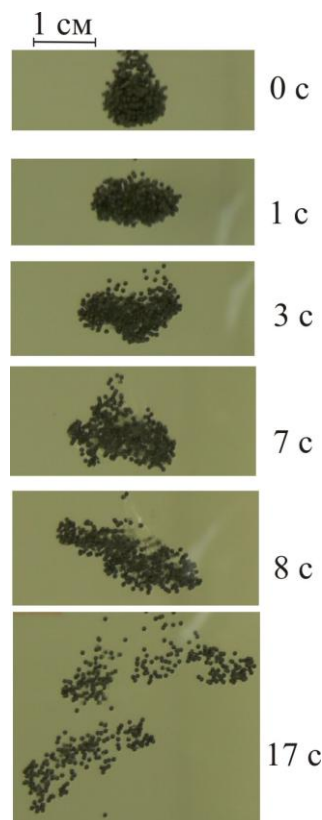


Рисунок 3 – Видеокадры процесса осаждения стальных шариков в глицерине

В качестве примера на рисунке 3 приведены видеокadres процесса гравитационного осаждения совокупности стальных шариков ($D = 0.7$ мм) в водном растворе глицерина ($\mu = 1.12$ Па·с) в разные моменты времени. Момент времени $t = 0$ с соответствует образованию начального сферического облака из совокупности частиц.

Из рисунка 3 следует, что в процессе осаждения конфигурация и объем облака существенно изменяется, что согласуется с результатами других авторов [12]. Показано, что процесс осаждения облака частиц можно разделить на три стадии: формирование, движение и распад сфероидального облака.

Обработка результатов проведенной серии экспериментов позволила получить уточненные зависимости для коэффициента сопротивления совокупности частиц от начальной объемной концентрации и режима осаждения в диапазоне малых чисел Рейнольдса (рисунок 4).

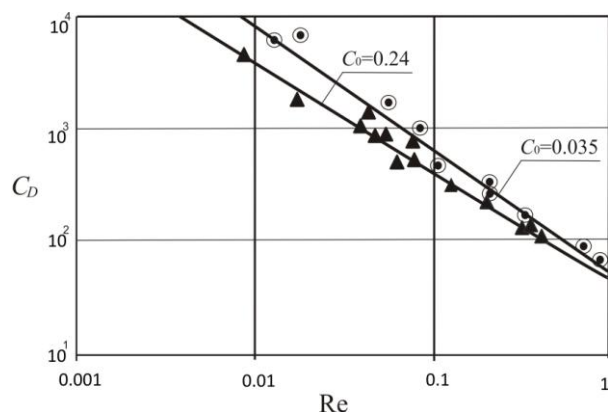


Рисунок 4 – Зависимость коэффициента сопротивления совокупности частиц от числа Рейнольдса

ИССЛЕДОВАНИЕ ОСАЖДЕНИЯ СОВОКУПНОСТИ ЧАСТИЦ В РЕЖИМЕ ЧАСТИЧНО ПРОДУВАЕМОГО И ПРОДУВАЕМОГО ОБЛАКА

В режиме продуваемого облака расстояние между частицами велико, при этом центр масс облака частиц движется со скоростью одиночной частицы из этого облака. Скорость стационарного осаждения данного облака частиц равна скорости осаждения одиночной частицы

Режим частично продуваемого облака является наиболее сложным. 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.

Для исследования данных режимов осаждения облака из совокупности частиц предложен способ, включающий элементы экспериментальной установки, представленной на рисунке 1, за исключением способа введения частиц в жидкость [13]. Частицы в жидкость вводят с помощью плоского диска с равномерно размещенными на его поверхности отдельными ячейками в форме сферических сегментов (рисунок 5). В каждую из ячеек помещена предварительно смоченная рабочей жидкостью твердая частица. Диск с направленными вниз частицами размещен в верхней части кюветы с возможностью одновременного отрыва частиц при их контакте с рабочей жидкостью в кювете.

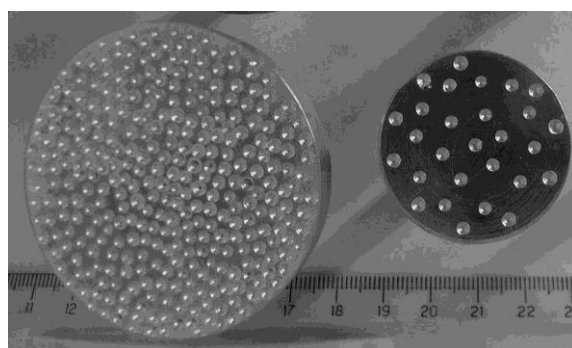


Рисунок 5 – Устройство для введения частиц в жидкость

Характер отрыва частиц от диска с ячейками сферической формы и, в частности, формирование сферического облака равномерно распределенных частиц зависит от диаметра и глубины ячеек. Результаты экспериментов для разных значений радиуса и глубины ячеек показали, что равномерный отрыв с последующим формированием близкого к сферическому симметричного облака из совокупности частиц происходит лишь при следующих значениях радиуса r и глубины H ячеек:

$$r \geq 0.75D, H \leq 0.5D.$$

При использовании ячеек со значениями $r < 0.75D, H > 0.5D$ в экспериментах наблюдался неодновременный отрыв частиц от диска (с разницей по времени отрыва первой и последней частицы до 1 минуты) или отсутствие отрыва частиц от диска.

Эксперименты по созданию совокупности частиц показали, что через некоторый промежуток времени облако частиц после отрыва от ячеек диска принимает форму,

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ГРАВИТАЦИОННОГО ОСАЖДЕНИЯ КОНСОЛИДИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ ЧАСТИЦ

близкую к сферической. При этом диаметр образуемого облака частиц D_c зависит от диаметра диска D_d , диаметра частиц и коэффициента динамической вязкости жидкости. В широком диапазоне этих параметров:

$$D_c \sim (0.2 \div 0.4) D_d.$$

Для оценки можно принять $D_c = 0.3 D_d$.

Количество ячеек в диске выражается из формулы для начальной объемной концентрации совокупности частиц:

$$C_0 = \frac{V}{V_{s1}}, \quad (7)$$

где V – суммарный объем частиц; V_{s1} – объем начального сферического облака из совокупности частиц.

Подставляя в (7) значения V_1 и V_{s1}

$$V = n \frac{\pi D^3}{6}, \quad V_{s1} = \frac{\pi (0.3 D_d)^3}{6},$$

получим формулу для определения количества ячеек в диске:

$$n = 0.027 C_0 \left(\frac{D_d}{D} \right)^3. \quad (8)$$

Формула (8) служит для оценки требуемого количества ячеек на поверхности диска по заданному ориентировочному значению C_0 . Уточненное значение начальной объемной концентрации C_0 определялось путем обработки видеоряда, полученного в результате двухкурсовой видеосъемки процесса осаждения облака частиц.

Эффективность заявляемого способа подтверждена проведением серии экспериментов по исследованию влияния начальной концентрации на характер гравитационного осаждения и коэффициент сопротивления совокупности частиц при малых числах Рейнольдса. В экспериментах начальная объемная концентрация частиц варьировалась в диапазоне $C_0 = 2.3 \cdot 10^{-5} \div 0.032$ за счет изменения количества ячеек n на диске и диаметра диска D_d в диапазонах $n = (62 \div 264)$, $D_d = (3 \div 7)$ см. В экспериментах использовались стальные диаметром $D = (0.2 \div 2.0)$ мм и стеклянные диаметром $D = 1.0$ мм шарики. Режим осаждения совокупности частиц варьировался за счет изменения коэффициента динамической вязкости жидкости (водные растворы глицерина, силиконовое масло ПМС-10000) в диапазоне $\mu = (0.83 \div 12.4)$ Па с и диаметра шариков. При этом диапазон изменения чисел Рейнольдса составлял $Re = (0.001 \div 1.0)$.

В качестве примера на рисунке 6 приведены видеок cadры процесса гравитационного осаждения совокупности стальных шариков ($D = 1.3$ мм) в силиконовом масле ПМС-10000 ($\mu = 11.06$ Па с) в разные моменты времени. Момент времени $t = 130$ с соответствует образованию начального сферического облака из совокупности частиц. Из рисунка 6 следует, что в процессе осаждения конфигурация и объем облака существенно изменяется, что согласуется с результатами других авторов [5].

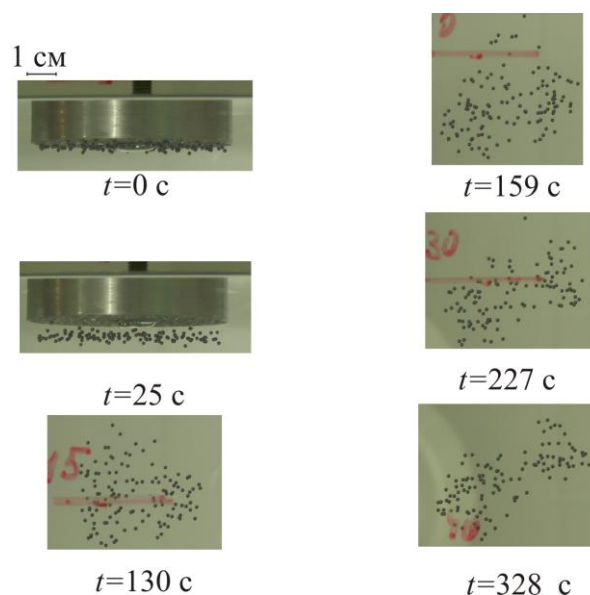


Рисунок 6 – Фотографии процесса гравитационного осаждения совокупности стальных шариков в полиметилсилоксановой жидкости ПМС-10000 в режиме частично продуваемого облака

ВЫВОДЫ

Предложены способы исследования гравитационного осаждения совокупности твердых сферических частиц, позволяющий повысить точность определения основных характеристик и динамики осаждения совокупности частиц за счет создания исходного сферического облака с заданной начальной концентрацией частиц и с нулевой начальной скоростью осаждения.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 15-19-10014).

УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

b – сторона квадрата в основании кюветы, м;

C_0 – начальная объемная концентрация частиц;

d – диаметр слоя частиц на пластине, м;
 D – диаметр твердой частицы, м;
 h – высота сферического сегмента слоя частиц, м;
 H – высота ячейки, м;
 m – масса отдельной твердой частицы, кг;
 M – суммарная масса совокупности частиц, кг;
 n – количество ячеек;
 r – радиус ячейки, м;
 V – суммарный объем частиц, м³;
 Re – число Рейнольдса;
 μ – коэффициент динамической вязкости жидкости, кг/(м·с);
 ρ – плотность материала твердой частицы, кг/м³.

ИНДЕКСЫ

c – облако частиц;
 d – диск.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Соу, С. Гидродинамика многофазных систем / С. Соу. – М.: Мир, 1971. – 536 с.
2. Броунштейн, Б. И. Гидродинамика, массо- и теплообмен в дисперсных системах / Б. И. Броунштейн, Г. А. Фишбейн. – Л.: Химия, 1977. – 279 с.
3. Crowe, C. T. Multiphase flows with droplets and particles / C. T. Crowe, M. Sommerfeld, Y. Tsuji. – USA: CRC Press, 1998. – 471 p.
4. Хоргуани, В. Г. О характере и скорости падения системы частиц одинаковых размеров / В. Г. Хоргуани // Физика атмосферы и океана. – 1966. – Т. 2, № 4. – С. 394–401.
5. Metzger, B. Falling clouds of particles in viscous fluids / B. Metzger, M. Nicolas, E. Guazzelli // Journal of Fluid Mechanics. – 2007. – № 580. – P. 283–301.
6. Machu, G. Coalescence, torus formation and break-up of sedimenting drops: Experiments and computer simulations / G. Machu, W. Meile, L. C. Nitsche,

U. Schaffinger // Journal of Fluid Mechanics. – 2001. – № 447. – P. 299–336.

7. Abade, G. C. Computer simulation of particle aggregates during sedimentation / G. C. Abade, F. R. Cunha // Computer methods in applied mechanics and engineering. – 2007. – № 196. – P. 4597–4612.

8. Способ исследования процесса гравитационного осаждения совокупности твердых частиц в жидкости: Заявка на патент РФ: МПК В01L 99/00 / Архипов В. А., Усанина А. С., Шрагер Г. Р. – Приорит. № 2015143575 от 12.10.2015 г.

9. Зимон, А. Д. Адгезия жидкости и смачивание / А. Д. Зимон. – М.: Химия, 1974. – 416 с.

10. Хаппель, Дж. Гидродинамика при малых числах Рейнольдса / Дж. Хаппель, Г. Бреннер – М.: Мир, 1976. – 630 с.

11. Arkhipov, V. A. Gravitational sedimentation of cloud of solid spherical particles at small Reynolds numbers / V. A. Arkhipov, A. S. Usanina // EPJ Web of Conferences. Thermophysical Basis of Energy Technologies. – 2015. – Vol. 82. 01017.

12. Daniel, W. B. Clusters of sedimenting high-Reynolds-number particles / W. B. Daniel, R. E. Ecke, G. Subramanian, D. L. Koch // E Journal of Fluid Mechanics. – 2009. – Vol. 625. – P. 371–385.

13. Установка для исследования осаждения совокупности твердых частиц в жидкости: Заявка на патент РФ: МПК В01L 99/00 / Архипов В. А., Золоторев Н. Н., Усанина А. С. – Приорит. № 2015/51097 от 27.11.2015 г.

Антонникова Александра Александровна, к.ф.-м.н., м.н.с., НИИ ПММ ТГУ, e-mail: antonnikova.a@mail.ru, +79069642228

Архипов Владимир Афанасьевич, д.ф.-м.н., профессор, НИИ ПММ ТГУ, e-mail: leva@niipmm.tsu.ru.

Усанина Анна Сергеевна, к.ф.-м.н., с.н.с., НИИ ПММ ТГУ, тел.: +79234171842, e-mail: usaninaanna@mail.ru.

Титов Сергей Сергеевич, к.т.н., ученый секретарь, ИПХЭТ СО РАН, e-mail: titov.sergey.s@gmail.com.